

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВЕ И ПЛАНИРОВКЕ ТЕРРИТОРИЙ

ТОМ 01
№ 3
2022

- СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ
- ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
- ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
- СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА
- ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ
- УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА





Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий

Т. 1, № 3, 2022

Электронный научно-практический журнал

Учредитель и издатель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

В журнале публикуются научные статьи по следующим направлениям:

– Строительные конструкции, здания и сооружения;
– Основания и фундаменты, подземные сооружения;
– Строительные материалы и изделия;
– Технология и организация строительства;
– Строительная механика;
– Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов;
– Управление жизненным циклом объектов строительства.

Учредитель и издатель журнала является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС77-83923 от 16 сентября 2022 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Над номером работали:
С.Г. Студенникова, А.О. Северин, С.А. Еременко

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372
https://sovtends.elpub.ru/
E-mail: sovtendstr@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ





УДК 658.5:69.003
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-4-15

Научная статья



Применение BIM-технологий на всех стадиях жизненного цикла строительного проекта

И. В. Новоселова ✉, **И. А. Чернявский**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ irina1000000@gmail.com

Аннотация

Введение. В существующих реалиях для выполнения задач строительных организаций в условиях ограниченности ресурсов, высокого уровня конкуренции и большой степени неопределенности рынка применение современных информационных технологий на всех фазах жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта приобретает приоритетное значение.

Применение BIM-технологии возможно на всех этапах жизненного цикла строительного проекта. Это обуславливает его преимущество перед традиционными инструментами управления проектами. Использование BIM-технологий дает возможность на протяжении всего жизненного цикла проекта добавлять и аккумулировать информацию об объекте капитального строительства в информационной 3D-модели. В связи с этим возможно оптимизировать такие важные процессы управления, как планирование, проектирование, материально-техническое обеспечение, строительно-монтажные работы, пусконаладка оборудования и сдача законченного строительством объекта в эксплуатацию. Используя информационную модель, возможно контролировать и координировать ход выполнения работ на всех участках и фазах проекта.

Материалы и методы. В данном исследовании рассматривается возможность формирования и исполнения всех этапов реализации инвестиционно-строительных проектов, в том числе анализ и прогнозирование при последующей эксплуатации объекта, с применением BIM-технологий. Внедрение BIM-технологии при разработке инвестиционно-строительных проектов позволяет снизить риски ошибок, оперативно вносить изменения в проект и извлекать необходимые данные об объекте, а также существенно облегчить процесс контроля хода выполнения работ.

Результаты исследования. Управление строительным проектом на всех фазах жизненного цикла с использованием BIM-технологий включает пять основных стадий, которые позволяют экономить не только временные, но и финансовые ресурсы при реализации проектов. BIM-модель обеспечивает накопление информации об объекте в таком объеме и составе, на основе которого можно принимать своевременные управленческие решения, а также избегать неверных расчетов потребности во временных, трудовых, финансовых и других ресурсах, а также несоответствий между конструктивными элементами объекта и его инженерными коммуникациями.

Использование BIM-модели дает возможность точного планирования работы машин и механизмов, формирования актуальных графиков закупки материалов и оптимизации основных логистических процессов строительства и эксплуатации.

Обсуждение и заключения. В настоящее время среда и культура применения BIM-технологий в России развиты недостаточно, технологии не используются в полную силу. В большинстве отечественных проектов отсутствует интеграционное применение BIM. Переход на технологию BIM при реализации инвестиционно-строительных проектов в России еще займет некоторое время. Однако с учетом масштабов и сложности выполняемых проектов положительные результаты от внедрения BIM будут нарастать, привлекая все больше субъектов инвестиционно-строительной сферы к использованию современных технологий.

Применение BIM-технологии на всех этапах жизненного цикла строительных проектов будет способствовать значительному повышению уровня управления процессами, обеспечению высокого качества строительной продукции, снижению затрат и сокращению сроков строительства. Как важный способ информатизации в строительной отрасли, внедрение BIM-технологий во все этапы всего жизненного цикла объектов в значительной степени будет способствовать трансформации строительной отрасли.

Ключевые слова: инвестиционно-строительный проект, BIM-моделирование, управление проектом, строительная отрасль, информационная модель.

Для цитирования. Новоселова, И. В. Применение BIM-технологий на всех стадиях жизненного цикла строительного проекта / И. В. Новоселова, И. А. Чернявский // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 4–15. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-4-15

Original article

Application of BIM Technologies at All Stages of a Construction Project Life Cycle

Irina V. Novoselova ✉**, Ilya A. Chernyavsky** 

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ irina1000000@gmail.com

Abstract

Introduction. In the current realia of limited resources, high level of competition and high degree of market uncertainty the use of the modern information technologies at all stages of the construction investment project life cycle aimed at facilitating the construction companies in fulfilling their tasks becomes a priority. The implementation of BIM technologies is possible at all stages of a construction project life cycle. This is its advantage over traditional project management tools. The use of BIM technologies makes it possible to add and accumulate information about a capital construction facility in a 3D virtual model throughout the entire life cycle of the project. In this regard, it is possible to optimize such important managerial processes as planning, designing, supply chain management, building and erecting, equipment installment and commissioning of the completed facility. Thanks to using the virtual model, it is possible to control and coordinate the progress of works in all areas and at all stages of the project.

Materials and methods. This study considers the possibility of forming and executing all stages of the construction investment projects using BIM technologies, including analysis and forecasting of the facility's subsequent operation. The use of BIM technologies in the development of the construction investment projects makes it possible to reduce the risk of errors, quickly revise the design and extract the necessary data about the facility, as well as facilitate work progress monitoring.

Results. Life cycle management of a construction project using BIM technologies includes five main stages that save not only time but also financial resources required for implementing the project. The BIM model ensures the accumulation of information about the facility in a scope and composition appropriate for making timely managerial decisions, as well as helps to avoid incorrect calculations of time, labor, finance and other resources demand, the same as inconsistencies between the structural elements of a facility and its engineering infrastructure.

The use of a BIM model makes it possible to accurately plan the operation of machines and equipment, generate up-to-date schedules for procurement of materials and optimize the main logistics processes within construction and operation.

Discussion and conclusion. At present, the context and tradition of BIM technologies application in Russia are underdeveloped, their full potential is not used. In most domestic projects there is no integrate application of BIM. The

transition to application of BIM technologies in the construction investment projects in Russia will still require some time. However, taking into account the scale and complexity of ongoing projects, the positive effect of BIM technologies implementation will increase encouraging more and more participants of construction investment market to turn to the use of modern technologies. The use of BIM technologies at all stages of construction projects life cycle will significantly contribute to boosting the level of process management, ensuring the high quality of construction products, reducing costs and time of construction. The implementation of BIM technologies at all stages of facilities entire life cycle is an important aid which will greatly foster the transformation of the construction industry in the context of its digitalization.

Keywords: construction investment project, BIM technologies, project management, construction industry, information model.

For citation. I. V. Novoselova, I. A. Chernyavsky. Application of BIM Technologies at All Stages of a Construction Project Life Cycle. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 4–15. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-4-15

Введение. Эффективное управление имеет решающее значение при реализации инвестиционно-строительных проектов на каждом из этапов их жизненного цикла [1]. При переходе к цифровой экономике особую актуальность приобретают инновации в области цифровой трансформации деятельности организаций строительной отрасли, позволяющие обеспечить выполнение инвестиционно-строительных проектов с обеспечением установленных сроков, стоимости и качества на всех этапах жизненного цикла, а также минимизировать возможные риски [2].

Традиционно в жизненном цикле строительного проекта выделяют пять основных этапов: инициирование, планирование, выполнение, мониторинг и управление, закрытие (рис. 1). Всеобъемлющая модель жизненного цикла проекта любого вида необходима для разработки плана его реализации от начальной стадии до полного завершения [3]. Этапы жизненного цикла различаются по продолжительности и интенсивности в зависимости от потребностей отдельного проекта.



Рис. 1. Основные фазы жизненного цикла строительного проекта (рисунок авторов)

В настоящее время схема организационно-технологического взаимодействия участников строительных проектов и их функциональные обязанности достаточно четко определены, поэтому все процессы, происходящие на различных этапах жизненного цикла проекта, логичны, т. к. имеется большой опыт их реализации [4].

С целью снижения рисков, неопределенности и повышения эффективности реализации инвестиционно-строительных проектов на современном этапе строительным компаниям полного цикла следует активно применять и внедрять в производство современные информационные технологии, в том числе технологии BIM-моделирования [5].

Материалы и методы. Использование информационных технологий при разработке инвестиционно-строительных проектов позволяет снизить риски ошибок, оперативно вносить изменения в проект и извлекать необходимые данные об объекте, а также существенно облегчает процесс контроля хода выполнения работ [6]. BIM-технологии применимы на всех этапах жизненного цикла строительного проекта, что обуславливает преимущество такого метода перед традиционными инструментами управления проектами.

Фактически суть BIM заключается в целостном и всестороннем цифровом моделировании всех свойств, касающихся здания, планирования процесса строительства, процессов обслуживания и использования. Кроме того, обеспечивается управление информацией на протяжении всего жизненного цикла объекта недвижимости, что имеет большое значение для реализации проекта и комплексного управления этапами реализации. Это сочетается с общей целью BIM по интеграции и поддержке всех вовлеченных экспертов, стремящихся к улучшению сотрудничества, для повышения эффективности реализации строительных проектов.

При использовании BIM-технологий информация об объекте капитального строительства на протяжении всего жизненного цикла может добавляться и аккумулироваться в информационной 3D-модели, что оптимизирует такие важные процессы управления, как планирование, проектирование, материально-техническое обеспечение, строительно-монтажные работы, пуско-наладку оборудования и сдачу законченного строительством объекта в эксплуатацию. При этом посредством использования информационной модели возможно контролировать и координировать ход выполнения работ на всех участках и фазах проекта.

BIM-технологии позволяют интегрировать информацию о проектах, имеющуюся у строительной фирмы, с новыми сведениями, появляющимися после перехода организации на BIM [7]. При использовании BIM-технологий выполняется обмен информационными ресурсами между существующими системами организации строительной сферы и информационной моделью. Таким образом, BIM-модель является источником всех необходимых данных для организации материально-технического снабжения, календарного планирования, внутрифирменной корпоративной организации и общего процесса управления инвестиционно-строительным проектом (рис. 2).



Рис. 2. Жизненный цикл строительного объекта согласно концепции BIM [8]

Результаты исследования. Ключевым элементом внедрения BIM-технологий является определение степени детализации информационной модели на каждом из этапов жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта. BIM-модель должна обеспечивать накопление информации об объекте в таком объеме и составе, чтобы, опираясь на него, было возможно принимать своевременные управленческие решения [9].

Процесс создания объекта строительства по технологии BIM выделяет пять основных стадий, представленных на рис. 3. Таким образом, BIM-технологии уже на предпроектном этапе позволяют всем участникам инвестиционно-строительного проектирования лучше воспринимать строительный объект. Такая вовлеченность позволяет достичь высокого качества результатов реализации проекта, т. к. учитывает весь комплекс знаний и опыта экспертов.

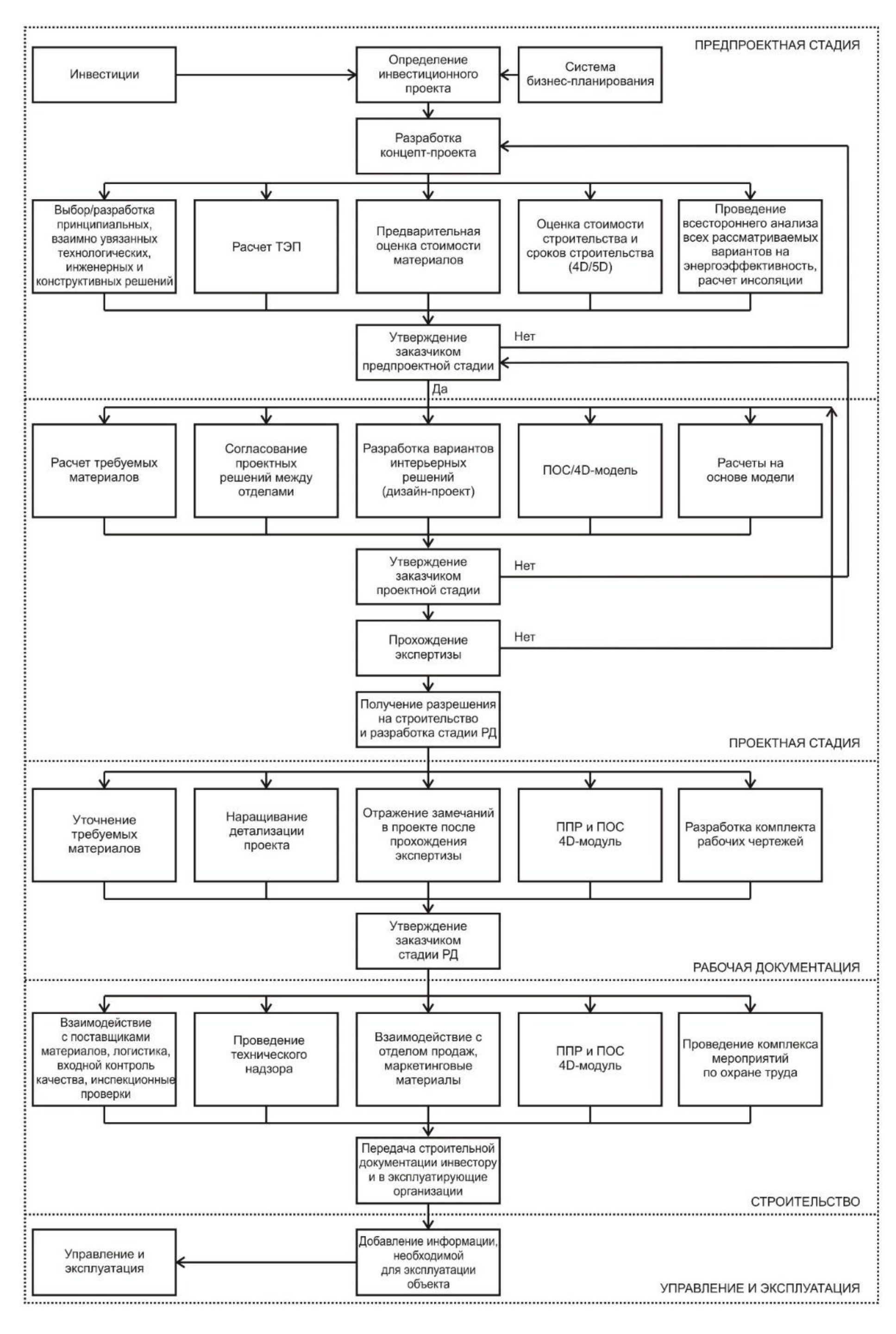


Рис. 3. Управление строительным проектом на всех фазах жизненного цикла с использованием BIM-технологий (рисунок авторов)

Традиционный подход к реализации инвестиционно-строительных проектов подразумевает преимущественно последовательное выполнение всех этапов жизненного цикла. Такой подход в случае внесения изменений в проект значительно увеличивает сроки выполнения проектных и строительно-монтажных работ [10]. При этом применение BIM-технологий позволяет организовать работу участников инвестиционно-строительного проекта в группе и на более высоком уровне, в том числе с возможностью оперативного отслеживания изменений проекта. Кроме того, ввиду высокой интеллектуальности программных ресурсов BIM по сравнению с 2D-системами, позволяют экономить не только временные, но и финансовые ресурсы при реализации проектов [11]. Например, использование современных информационных технологий на предпроектной стадии позволяет перенести на проектную стадию до 30 % информации, при этом использование традиционных информационных технологий подразумевает, что работа на проектном этапе начинается практически с нуля. Также различного рода «пересечения», ошибки и логистические нестыковки при работе с технологиями BIM можно отследить сразу, благодаря специальным инструментам, осуществляющим проверку, и 3D-моделям, что позитивно отражается на качестве выполнения инвестиционно-строительного проекта.

Несмотря на то, что в стоимости инвестиционно-строительного проекта на стадию проектирования приходится достаточно незначительная часть средств (около 5 % от общей стоимость проекта), ошибки, совершенные на этом этапе, приводят к значительным, в том числе незапланированным, затратам на более поздних этапах реализации инвестиционно-строительного проекта [12].

К наиболее распространенным ошибкам в проектах относятся неверные расчеты потребности во временных, трудовых, финансовых и других ресурсах, а также несоответствия между конструктивными элементами объекта и его инженерными коммуникациями (например, недостаток технологических отверстий для устройства инженерных сетей или их отсутствие) [13]. Такие коллизии зачастую являются следствием неэффективного организационного взаимодействия и коммуникации специалистов, выполняющих различные части и разделы проекта (инженеры, архитекторы, конструкторы).

В целях минимизации ошибок в разработке проекта и последующего сокращения разницы между запланированными и фактическими издержками на строительные работы, а также эксплуатации объекта капитального строительства на основе единой информационной модели может быть организована совместная работа всех специалистов, участвующих в разработке инвестиционно-строительного проекта.

Использование BIM-модели позволяет точно спланировать работу машин и механизмов на строительной площадке, сформировать актуальные графики закупки материалов и оптимизировать основные логистические процессы строительства и эксплуатации. По завершении строительных работ технологии BIM позволяют надлежащим образом сформировать сопутствующую исполнительную документацию, что в значительной степени упрощает процесс сдачи-приемки строительного объекта, ввиду наличия необходимых сведений об ответственных производителях каждого вида работ, а наличие комплекса данных о техническом состоянии объекта позволяет в последующем сократить стоимость его эксплуатации.

Обсуждение и заключения. Задачи процесса использования информационной модели на различных этапах жизненного цикла объекта капитального строительства должны быть выстроены следующим образом.

1. На предпроектной стадии при активном взаимодействии проектировщика и службы заказчика осуществляется сбор исходной информации, после чего заказчик формирует свои требования к проектной организации по созданию BIM-модели проекта и предоставляет техническое задание и приложение EIR (Employer Information Requirements) к нему, в котором отражается требуемая заказчиком информация с учетом формата и уровня проработки отдельных элементов (LOD). Именно уровень проработки устанавливает полноту BIM-модели, т. е. определенный объем информации, которая будет использоваться при решении задач

информационного моделирования на различных этапах жизненного цикла объекта [14]. Уровень проработки в обязательном порядке включает уровень геометрической проработки (LOD G) и уровень информационной проработки (LOD I). После предоставления проектировщику технического задания его задачами является разработка исполнительного плана информационной модели BEP (BIM Execution Plan), а также формирование рабочей среды с готовыми шаблонами, атрибутами, библиотеками. Исполнительный план проекта с использованием BIM-технологий отражает этапы, правила его реализации (структуру, название файлов), формирует контрольный список проверки информационной модели, определяет средства коммуникации и задачи участников проекта, устанавливает результаты проектирования и его рамки. Также на данном этапе устанавливается BIM-стандарт – документ, определяющий требования к процессу создания информационной модели проекта вместе со средой общих данных, а также взаимодействие заказчика с проектной организацией, подрядчиками, эксплуатирующей организацией.

Разработка инвестиционных решений является наиболее ответственным этапом на предпроектной стадии, на котором экономически и технически обосновываются различные варианты инвестирования, а после сравнения выбирается наилучший вариант [15]. Ошибка в принятии решения зачастую может принести предприятию невосполнимые убытки, поэтому этапу разработки инвестиционного обоснования проекта необходимо уделять особое внимание. Содержание этапа инвестиционного обоснования является основой для определения стоимости проекта, а правильные инвестиционные решения требуют точного понимания состава и объема затрат по каждому варианту. Поэтому, исходя из технической осуществимости, важно выполнить оценку инвестиций для каждого возможного варианта реализации проекта. Использование электронно-табличных архивов в данном случае получило широкую популярность, но по многим причинам объем данных, которые можно накапливать в них, невелик. В информационную модель же включаются большие объемы данных о затратах, которые можно сравнить непосредственно в программном обеспечении и визуализировать. Стоимость и общий объем работ могут быть рассчитаны для нескольких направлений затрат. На основе этой процедуры принятие инвестиционных решений упрощается, позволяя намного эффективнее реализовывать инвестиционно-строительный проект.

2. На этапе проектирования использование BIM-моделирования в разы повышает качество выполнения работ, по сравнению с традиционным проектированием, за счет высокой междисциплинарной координации, а также дает возможность создавать точные спецификации конструкций, материалов, объемов выполняемых работ и, что важно, выполнить расчет энергоэффективности здания с последующим определением его класса [16]. Но главная задача BIM-проектирования на данном этапе — это непосредственно создание цифровой информационной модели объекта капитального строительства с одновременным формированием проектной, рабочей документации, а также архитектурных буклетов с параметрической моделью объекта, внедренной в существующую окружающую обстановку. После создания информационной модели заказчик совместно с проектировщиком проводят ее комплексный анализ с исправлением коллизий элементов объекта. Одновременно с этим проектная организация осуществляет проработку графиков производства работ и разработку 4D-BIM-модели самого процесса строительства при помощи атрибута времени, после чего цифровая информационная модель проходит экспертизу, согласно которой вносятся изменения в соответствии с замечаниями экспертизы. Завершается этап проектирования созданием спецификаций, ведомости объемов работ и сметных расчетов. В среде общих данных на данном этапе в обязательном порядке формируются четыре области, через которые последовательно проходят проектные данные:

– рабочие данные — локальные данные, которые используются отдельной дисциплинарной группой проектировщиков;
– общие данные — данные для согласования проектных промежуточных решений и междисциплинарной координации;

– опубликованные данные — утвержденные проектные данные, предназначенные для передачи заказчику с последующим согласованием;

– архивные данные, в которых хранятся все версии проекта в соответствии с регламентами в организации.

Предпроектная стадия и проектирование являются ключевыми этапами применения BIM-технологий. Именно на этих этапах формируется основной объем информации, выполняется визуализация модели, строится параметрический трехмерный физический образ здания. Параметрическая модель объекта позволяет обнаруживать коллизии на этапе проектирования, чтобы избежать возникновения проблем во время фактического строительства. Таким образом, это не только повышает эффективность проектирования, но и экономит трудовые ресурсы, а также оказывает положительное влияние на последующее управление процессом строительства.

3. На этапе строительства объекта цифровая информационная модель используется для контроля за процессом возведения объекта, осуществления контроля за своевременностью сроков строительства, выявления отступлений и выполнения расчетов необходимых ресурсов [17]. Для качественного выполнения работ подрядчик использует на строительной площадке цифровую информационную модель и при этом дополняет ее новыми деталями и элементами, рассчитывает объемы требуемых строительных материалов, координирует готовность объекта согласно модели и проводит ее увязку с графиком производства работ. Заказчик в свою очередь осуществляет контроль выполненных дополнений подрядчика в соответствии с нормативными документами и согласовывает эти изменения с проектной организацией, которая выполняет проверку изменений на соответствие их техническим регламентам, а также осуществляет авторский надзор за выполнением проектных решений с использованием BIM-модели. Также необходимо отметить, что неотъемлемой частью использования цифровой информационной модели на строительной площадке является осуществление подрядчиком исполнительной съемки фактически выполненных работ, смонтированных инженерных систем, оборудования с последующим внедрением результатов сканирования в информационную модель, в результате чего формируется исполнительная цифровая информационная модель строящегося здания.

4. На этапе эксплуатации объекта капитального строительства цифровая информационная модель передается в распоряжение эксплуатирующей организации, в результате чего она становится главным BIM-менеджером после ввода объекта в эксплуатацию. На этом этапе также происходит трансформация BIM-модели, в которую вносится большое количество новых изменений и дополнений в процессе эксплуатации здания, например, при плановом, капитальном ремонте, реконструкции, модернизации. Итогом является цифровая информационная эксплуатационная модель объекта капитального строительства, при помощи которой возможно осуществлять прогноз затрат на выполнение ремонтных работ, замену оборудования и различных расходных элементов, а также контроль за состоянием конструктивных элементов, инженерного оборудования с помощью организации связи эксплуатационной информационной модели с соответствующими датчиками. Важно отметить, что стоимость технического обслуживания является основной статьей расходов фазы эксплуатации, а качество и регулярность технического обслуживания напрямую влияет на срок службы строительных изделий [18]. Информация, предоставляемая BIM-моделью, помимо того, что помогает в разы экономить финансы, также может быть использована для составления плана технического обслуживания, поиска расположения скрытых систем здания, при регулировании энергопотребления объекта путем анализа и сравнения различных альтернатив. Информация об инженерном оборудовании зданий, хранящаяся в информационной модели, также полезна для создания базы данных, необходимой для текущего профилактического обслуживания.

BIM-модель обеспечивает информацией организации, занимающие большие офисные площади, с целью управления пространством и занятостью. Интегрируя данные о зданиях с данными о человеческих ресурсах, строительная фирма может оптимизировать размещение рабочих мест и значительно сократить расходы на аренду и содержание недвижимости [19].

Важно отметить, что весь процесс использования BIM-технологий на всех этапах жизненного цикла строительного проекта, включая проектирование, строительство и эксплуатацию, представляет собой непрерывный процесс оптимизации. При этом можно выделить три ограничивающих оптимизацию фактора: недостаток информации, сложность и время. Без надежных данных не может быть требуемого результата оптимизации. Цифровая информационная модель включает в себя реальную информацию о здании, такую как геометрическая информация, физическая информация, фактическое состояние строительного объекта после изменения. Уровень сложности современных проектов настолько велик, что для их выполнения требуется помощь современных технологий. Сложные современные проекты могут быть оптимизированы с использованием BIM. Например, как было отмечено ранее, влияние модификаций проекта на экономическую эффективность инвестиций может быть определено в режиме реального времени путем слияния проектных решений с анализом рентабельности инвестиций. Таким образом, выбор схемы проектирования будет основываться не столько на оценке формы, сколько на определении того, какой вариант реализации проекта в наибольшей степени соответствует требованиям заказчика.

В настоящее время BIM-технологии активно применяются в основном на предпроектной стадии, стадии проектирования и частично на этапе строительства, но при этом они не нашли должного применения на этапе эксплуатации. Таким образом, в большинстве отечественных проектов отсутствует интеграционное применение BIM, в результате возможности таких технологий не используются в полную силу. Совершенная BIM-система должна иметь возможность связывать данные, процессы и ресурсы на разных этапах всего жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта, чтобы обеспечить среду комплексного управления, совместную работу и возможность принятия решений для всех участников проекта.

В настоящее время малые и средние предприятия строительной сферы в России, экономя на программном обеспечении, не проявляют интерес в отношении применения BIM-технологий. Отсутствие среды и культуры применения BIM-технологий в России связанно также с неразвитостью единых стандартов применения BIM и их неясной правовой ситуацией. Вследствие этого необходимо установить соответствующие правовые нормы и стандарты для решения таких проблем, как претензии, споры и другие вопросы, возникающие при реализации инвестиционно-строительных проектов, в том числе в области определения права собственности на модель BIM, а также ответственности при возникновении ошибок применения BIM-технологий на этапе строительства для всех участников строительного процесса. Возможным решением этой проблемы может послужить разработка отраслевых стандартов BIM, унифицированных спецификаций и соответствующих законов с уточнением юридической ответственности и прав интеллектуальной собственности. Наряду с этим повысить культуру применения BIM-технологий возможно путем привлечения организаций профильного профессионального образования, а также осуществления подготовки заказчиков и подрядчиков для использования цифровых информационных моделей. Также стоит отметить, что недостаток организованного управления информационной моделью наблюдается и в доработанных построенных объектах при разрешении вопросов их перепрофилирования и реконструкции, что обуславливает необходимость расширения возможностей использования BIM-технологий собственниками объектов недвижимости.

Переход при реализации инвестиционно-строительных проектов в России на технологию BIM еще займет некоторое время [20]. Однако с учетом масштабов и сложности выполняемых проектов положительные

результаты от внедрения BIM будут нарастать, привлекая все больше субъектов инвестиционно-строительной сферы к использованию современных технологий. В целом, применяя BIM-технологии на всех этапах жизненного цикла строительных проектов, можно значительно повысить уровень управления ими, обеспечить высокое качество строительной продукции, снизить затраты и сократить сроки строительства. Как важный способ информатизации в строительной отрасли, внедрение BIM-технологий во все этапы всего жизненного цикла объектов в значительной степени будет способствовать трансформации строительной отрасли.

Разработчикам программного обеспечения BIM следует активно взаимодействовать со строительными организациями, использующими BIM-технологии на практике, для изучения методов управления BIM на протяжении всего жизненного цикла объектов, в целях адаптации к рыночным условиям и улучшения опыта управления посредством постоянной практики.

BIM-моделирование как основной инструмент управления жизненным циклом инвестиционно-строительного проекта вносит беспрецедентные изменения в строительную отрасль и может централизовать все виды информации об объекте капитального строительства на протяжении всего жизненного цикла с использованием цифровой информационной модели. Однако применение несовершенных отраслевых стандартов и отсутствие интегрированного опыта управления ограничивает внедрение BIM в полной мере как в России, так и в других странах мира.

Библиографический список

1. Гиря, Л. В. Анализ сферы управления проектами строительной деятельности / Л. В. Гиря, Т. Ш. Ахобадзе, Е. П. Попов, Е. В. Коренюгина, И. А. Ягода // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 11. — С. 56–63.

2. Zelentsov, L. B. The budget development processes' formalization for a construction project based on digital technologies / L. B. Zelentsov, L. D. Mayilyan, M. S. Shogenov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913. — P. 052005. DOI 10.1088/1757-899X/913/5/052005.

3. Kluchnikova, O. Application of strategic management principles as tool to improve quality of construction technological process / O. Kluchnikova, O. Pobegaylov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 262. — P. 012075. 10.1088/1757-899X/262/1/012075

4. Sheina, S. "Smart City": comfortable living environment / S. Sheina, A. Fedorovskaya, K. Yudina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 463. — P. 032095. DOI 10.1088/1757-899X/463/3/032095.

5. Томашук, Е. А. Влияние факторов рисков и неопределенности на работу строительного производства/ Е. А. Томашук, Д. В. Шишкунова // Научное обозрение. — 2013. — № 11. — С. 165–168.

6. Sheina, S. Integration of BIM and GIS technologies for sustainable development of the construction industry / S. Sheina, K. Chubarova, D. Dementeev, A. Kalitkin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Pp. 1303–1311. — DOI 10.1007/978-3-031-11058-0_132.

7. Mishchenko, A. V. BIM implementation of a full life cycle of building / A. V. Mishchenko, E. P. Gorbaneva, M. A. Preobrazhensky, V. Y. Mishchenko // AIP Conference Proceedings. — 2022. — Vol. 2559. — P. 040006. DOI 10.1063/5.0099692.

8. Лушников, А. С. Проблемы и преимущества внедрения BIM-технологий в строительных компаниях / А. С. Лушников // Вестник гражданских инженеров. – 2015. — № 6 (53). — С. 252–256.

9. Кравченко, Г. М. Информационное моделирование объекта параметрической архитектуры / Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, В. Г. Кочура // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2019. — № 1 (201). — С. 17–22.

10. Баркалов, С. А. Модели функционирования исполнителей коммерческих проектов / С. А. Баркалов, С. Г. Шеина, Р. Д. Зильберов // Интернет-журнал «Науковедение». — 2014. — № 2 (21). — С. 4.

11. Шеина, С. Г. Исследование этапов развития BIM-технологий в мировой практике и России / С. Г. Шеина, К. С. Петров, А. А. Федоров // Строительство и техногенная безопасность. — 2019. — № 14 (66). — С. 7–14.

12. Ivanova, D. G. The investment process features in housing construction of municipalities / D. G. Ivanova, O. E. Ivanova, S. A. Sukhinin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913. — P. 052017. DOI 10.1088/1757-899X/913/5/052017.

13. Zilberova, I. Actual problems of management quality control of a construction company / I. Zilberova, K. Petrov, M. Artsishevsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 753. — P. 042020. DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042020.

14. Kravchenko, G. Digital models of parametric structures / G. Kravchenko, L. Panasyuk, E. Trufanova, L. Pudanova // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — P. 022118. DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022118.

15. Лушников, А. С. Оценка эффективности использования технологий информационного моделирования при реализации инвестиционно-строительных проектов / А. С. Лушников // Вестник гражданских инженеров. — 2016. — № 5 (58). — С. 186–194.

16. Sevryukova, K. S. Factor systems simulation at all phases of an energy-efficient project life cycle / K. S. Sevryukova, E. P. Gorbaneva, V. Y. Mishchenko // AIP Conference Proceedings. — 2022. — Vol. 2 559. — P. 040009. DOI 10.1063/5.0099693.

17. Zilberova, I. Yu. The influence of the technological and organizational factors on the construction process / I. Yu. Zilberova, K. S. Petrov, A. N. M. Al Fatla // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 913. — P. 042019. DOI 10.1088/1757-899X/913/4/042019.

18. Girya, L. Organizational and technological computeraided process of real estate management / L. Girya, E. Zorenko, N. Ulianov, D. Egorov, A. Nechepurenko // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 263. — P. 04032. DOI 10.1051/e3sconf/202126304032.

19. Tsopa, N. V. The mechanism for managing the business potential of commercial real estate projects // N. V. Tsopa, L. S. Kovalskaya, V. V. Malachova // Materials Science Forum. — 2018. — Vol. 931. — Pp. 1220–1226. DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.1220.

20. Зильберова, И. Ю. Методологические основы организационно-технологической подготовки возведения объектов строительства / И. Ю. Зильберова, В. Д. Маилян, М. Д. Арцишевский // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 8. — С. 41.

Поступила в редакцию 20.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Новоселова Ирина Валерьевна — старший преподаватель кафедры «Городское строительство и хозяйство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, irina1000000@gmail.com

Чернявский Илья Александрович — магистрант кафедры «Городское строительство и хозяйство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, cross_fire_26rus@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

И. В. Новоселова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов. И. А. Чернявский — подготовка текста, анализ результатов исследований, формирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.





УДК 69.05
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-16-23

Научная статья



Моделирование деятельности строительной организации на основе искусственного интеллекта

К. М. Крюков ✉, **А. Газал**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ kkrioukov@gmail.com

Аннотация

Введение. В производственно-хозяйственной деятельности строительных организаций значительные усилия затрачиваются на оптимизацию строительных процессов. Проблемы, связанные с несвоевременной поставкой материально-технических и трудовых ресурсов, приводят к непроизводственным затратам и потерям для строительной организации. Для управления деятельностью строительной организации используются организационно-технологические модели, которые позволяют планировать строительные процессы с увязкой использования материально-технических, финансовых и трудовых ресурсов. Однако огромный объем предоставляемой информации не позволяет качественно и своевременно реагировать на изменяющиеся условия. Целью исследования является изучение возможности использования технологии искусственного интеллекта в процессе моделирования деятельности строительной организации.

Материалы и методы. В исследовании использовались методы сравнительного анализа и синтеза информации в сфере моделирования строительных процессов. Были проанализированы основные проблемы, возникающие в процессе управления организационно-технологическими моделями, и последствия от неэффективного управления строительством.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований было предложено передать разработку оптимальных организационно-технологических моделей с прогнозированием всех видов ресурсов по количеству и срокам поставки искусственным интеллектуальным системам. Наиболее предпочтительным методом представляется использование интеграции технологии цифровых двойников и искусственного интеллекта. Данный подход позволяет вносить изменения в физическую модель строительного производства через виртуальное пространство модели цифрового двойника. Визуализация элементов организационно-технологической модели строительства, работа в режиме реального времени с расчетом различных сценариев позволит значительно повысить эффективность функционирования строительной организации.

Обсуждение и заключение. Предложенный подход к совершенствованию организационно-технологического моделирования на основе агрегирования технологии цифровых двойников с машинной обработкой данных можно считать лишь первым этапом внедрения искусственного интеллекта в строительной отрасли, который начинает процесс цифровой трансформации строительства.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, организационно-технологическое моделирование, цифровые двойники, материальные ресурсы.

Для цитирования. Крюков, К. М. Моделирование деятельности строительной организации на основе искусственного интеллекта / К. М. Крюков, А. Газал // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 16–23. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-16-23

Original article

Modeling of the Construction Company Activities Based on Artificial Intelligence Technology

Konstantin M. Kryukov ✉, **Ahmad Gazal**

Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ kkrioukov@gmail.com

Abstract

Introduction. Among the construction companies production and business activities the significant efforts are allocated to the construction processes optimisation. Problems related to the untimely supply of material and labor resources cause a construction company the non-production costs and losses. In order to manage the activities of a construction company the organisational and technological models are used to plan construction processes in correlation with the use of material, financial and labor resources. However, the huge amount of provided information prevents from qualitative and timely feedback to the changing conditions. The aim of the study is to investigate the possibility of artificial intelligence technology application to the process of modeling the construction company activities.

Materials and methods. The methods of comparative analysis and synthesis of the information referring to the construction processes modeling were used. The main problems arising in the process of organisational and technological models management and the consequences of inefficient construction management were analysed.

Results. As a result of the research, it was proposed to transfer the development of optimal organisational and technological models capable of forecasting the quantity and delivery time of all types of resources to the artificial-intelligence systems. Mostly preferred method seems to be the integration of digital twin technology and artificial intelligence. This approach allows changing the physical model of construction production via virtual space of the digital twin model. Visualization of the organisational and technological construction model elements as well as work in real time, having various scenarios calculated, will significantly increase the efficiency of a construction company.

Discussion and Conclusions. The proposed approach on improvement of the organisational and technological modeling based on the aggregation of digital twin technology with machine data processing can be considered just the first step in implementation of artificial intelligence in the construction industry, giving start to digital transformation of construction.

Keywords: intelligent systems, organisational and technological modeling, digital twins, material resources.

For citation. Kryukov K. M., Gazal A. Modeling of the Construction Company Activities Based on Artificial Intelligence Technology. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 16–23. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-16-23

Введение. Деятельность строительных организаций нацелена на достижение основных ключевых показателей, к которым можно отнести продолжительность строительства объекта и сроки выполнения работ, стоимость строительства, качество выполняемых работ. Для достижения данных показателей разрабатываются модели организационно-технологических решений по выполнению строительно-монтажных работ, которые направлены в основном на обеспечение соответствия привлекаемых ресурсов строительной организации требованиям, диктуемым выполняемыми работами [1]. Основой организационно-технологического моделирования является разработка календарных планов на строительство отдельного объекта или комплекса объектов, входящих в стройку. Также необходимым элементом календарного планирования является составление расписания на производственную программу строительно-монтажной организации.

В целях эффективного управления строительством объекта при инженерно-технологической подготовке должен быть разработан календарный план производства работ или календарный план строительства, которые

формируются на основе организационно-технологической модели всех процессов реализации инвестиционно-строительного проекта. При разработке расписания выполняемых процессов особое внимание уделяется факторам технологии работ [2]. Организационно-технологические документы, разрабатываемые в составе проекта организации строительства или проекта производства работ, учитывают различную степень группировки составляемого плана. Независимо от степени детализации календарный план строительства должен учитывать материально-технические, финансовые и трудовые возможности строительно-монтажной организации, передовые методы организации и технологии выполняемых работ, соответствовать срокам строительства, установленным договором. Таким образом обрабатываемая информация для качественной разработки организационно-технологической модели строительства объекта и управления этой моделью представляет огромный массив данных. Кроме того, любой календарный план имеет ресурсные и технологические ограничения, которые должны учитываться при определении как сроков выполнения конкретных работ, так и сроков строительства объекта в целом. Для эффективного управления строительством обработать поступающую информацию с учетом временных ограничений и своевременно реагировать на изменяющиеся условия в период производства строительных работ без использования машинного интеллекта не представляется возможным. Целью исследования является изучение возможности использования технологии искусственного интеллекта в процессе моделирования деятельности строительной организации.

Календарное планирование, как часть системы организационно-технологического проектирования позволяет решить множество задач управления строительным производством, в том числе [3]:

– поставка строительных материалов в необходимые сроки;

– выбор потребных строительных машин и механизмов, обуславливающих производство работ в заданные сроки;

– определение организационно-технологической последовательности как отдельных работ, так и комплекса объектов;

– оптимизация сроков производства работ с учетом интенсивности их выполнения или изменения организации и технологии;

– управление строительством объекта или комплекса объектов при изменениях в процессе производства работ и отклонениях от запроектированного календарного плана.

Для того, чтобы оценить разработанный календарный план, который решает множество задач, необходимо оценить все вышеперечисленные критерии решения организационно-технологических задач. Следовательно, кроме сложности оптимизации календарного планирования, имеется проблема оценки смоделированного календарного плана, связанная с учетом множества критериев и их взаимосвязью и взаимодополнением.

На основании вышеизложенного можно судить, что только календарное планирование, как часть строительного производства, формирует огромное количество переменных, влияющих на эффективность деятельности строительной организации. Соответственно, возникает необходимость в интеллектуальной системе управления, которая сможет принимать эффективные решения на всех стадиях развития инвестиционно-строительного проекта с учетом нечетких параметров всех вышеперечисленных факторов.

Фактически сегодня человек выполняет эту работу. Однако в условиях огромного количества переменных факторов качественная обработка информации и принятие эффективных управленческих решений становится практически невозможным. Исполнитель не всегда может квалифицированно обрабатывать данные и разрешать возникающие проблемы. В реальности с запроектированным календарным планом работает линейный персонал строительной организации, на который возложено множество задач, связанных с управлением рабочими и субподрядными организациями. У него фактически не хватает времени оперативно отслеживать ход производства

работ и корректировать заявки на всевозможные виды ресурсов. Все это приводит к недостаточно эффективной работе с документацией, отчетами о ходе работ, корректировке календарного плана, заявками на необходимые материально-технические ресурсы и т.п. Передача функционала по решению таких задач по заранее определенному алгоритму машинной обработке может повысить эффективность их решения [4]. Естественно, должен быть применен комплексный подход: агрегирование алгоритмов машинного обучения с организационно-технологической моделью на основе строительных физических процессов.

При разработанной организационно-технологической модели строительства все процессы подчиняются стандартам. На современной стадии развития информационных технологий разработку оптимальных организационно-технологических моделей с прогнозированием всех видов ресурсов по количеству и срокам поставки можно передать интеллектуальным системам

Материалы и методы. Технологии искусственного интеллекта (ИИ) активно развиваются в различных отраслях. Решения ИИ, которые оказали влияние в других отраслях, начинают появляться в строительной отрасли. Цифровая трансформация строительной отрасли является одной из важнейших задач, стоящих перед экономикой России, и потенциал ее огромен.

Исследования Стэндфордского Университета (США) показали, что инвестиции в ИИ в 2021 году составили около 93,5 млрд. долларов США, что более чем вдвое превышает общий объем инвестиций в 2020 году. Наилучшие результаты в технических тестах все чаще зависят от использования дополнительных обучающих данных для установления новых передовых результатов. По состоянию на 2021 год 9 современных систем искусственного интеллекта из 10 тестов в этом отчете обучаются с использованием дополнительных данных [5]. Эта тенденция косвенно благоприятствует субъектам частного сектора, имеющим доступ к обширным наборам данных.

В рамках федерального проекта «Искусственный интеллект» национального проекта «Цифровая экономика» осуществляется государственная поддержка развития искусственного интеллекта в РФ [6].

Четкого общепринятого определения «искусственный интеллект» пока не зафиксировано, что приводит к недопониманию и каждым субъектом воспринимается по-своему.

В большинстве случаев под искусственным интеллектом специалисты понимают «машинное обучение – класс методов для решения задач на основании прецедентов и для поиска закономерностей по историческим данным производственных систем» [7].

Однако строительные организации в большинстве не имеют достаточных данных для поиска закономерностей. Это связано с недостаточным уровнем цифровизации как конкретных строительных организаций, так и всей отрасли в целом. Например, корректный расчет объемов выполняемых работ и необходимых для этого ресурсов (трудовых, материальных, финансовых и др.) возможен при использовании проектов, выполненных на основе технологии информационного моделирования зданий. Соответственно, одной из проблем для внедрения машинной обработки данных для решения задач организационно-технологического планирования является недостаточная база исходных данных. В целях пополнения такой базы данных рекомендуется использовать результаты реально принятых организационно-технологических решений при календарном планировании. При недостаточности информации можно применить вариантную проработку с использованием виртуальных данных организационно-технологического моделирования выполняемых инвестиционно-строительных процессов [7]. При этом разработанные варианты виртуальной модели должны соответствовать реальным условиям строительства. Только корректно наполненная достаточная база данных позволит добиться качественного прогноза для принятия эффективных решений.

Задачу агрегирования организационно-технологического моделирования на основе реальных строительных процессов и компьютерную обработку данных с последующим интеллектуальным обучением можно решить через создание цифровых двойников. Цифровой двойник – это комплексная динамическая модель, которая в реальном времени и с высокой точностью воспроизводит состояние и параметры работы строительного процесса при существующих условиях [8].

В связи с низкой степенью цифровизации строительных организаций представляется первым шагом создание цифрового двойника не организации в целом, а отдельного направления ее деятельности, связанного с организационно-технологическим моделированием строительства (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы создания цифрового двойника организационно-технологической модели строительства (рисунок авторов)

Цифровой двойник позволяет смоделировать систему календарного планирования, как части организационно-технологического моделирования строительных процессов, в целях поддержки принятия управленческих решений с выработкой рекомендаций на основе алгоритмов машинного обучения с учетом как фактических, так и смоделированных виртуальных данных [9].

Одной из проблем несвоевременной сдачи объектов в эксплуатацию является некачественная разработка календарных планов производства работ на строительство объектов. По причине некорректных или недостаточных исходных данных календарный план проектируется без необходимой детализации отдельных видов работ [10]. Применение технологии информационного моделирования зданий позволяет получить детальный объем исходной информации по всем строительным работам. Но обработать такой объем информации человек не в состоянии. Объем информации по количеству и технологической последовательности производства работ на отдельный объект или комплекс объектов на различных этапах инвестиционно-строительного проекта не позволяет корректно спрогнозировать все будущие характеристики объекта строительства [11].

Цифровой двойник позволяет планировать строительно-монтажные работы с различной степенью детализации и агрегирования, а также:

– сокращать сроки строительства и избегать задержек, связанных с непоставкой материально-технических и трудовых ресурсов;

– прогнозировать сроки строительства;

– использовать сценарии «что если» в целях повышения эффективности принятия решений при изменениях в ходе проекта;

– анализировать оперативные данные о ходе строительства в режиме онлайн для оптимизации задач организационно-технологического планирования;

– проверять решения, принимаемые в календарном планировании, при изменении в строительных проектах путем тестирования в безрисковой виртуальной среде;

– применять элементы «бережливого строительства» в целях ликвидации непроизводственных потерь времени.

Результаты исследования. Разработку цифрового двойника целесообразно начинать с одного проекта и в случае успешности распространить на другие проекты. В качестве подходов к организационно-технологическому моделированию целесообразно использовать системно-динамический и дискретно-событийный подходы. В модель должны быть загружены данные как из проекта, так и фактические данные возведения объекта [12]. Модель должна позволять совмещать различные уровни агрегации и детализации, а также объединять физические данные и прогнозные данные, заданные статистическим распределением. Следовательно, инженерно-технические работники будут иметь возможность формировать организационно-технологические модели на различных уровнях агрегации с переходом от более высокой степени агрегации к более детальной. Например, безрисковая цифровая среда позволяет протестировать различные входные данные (связанные со сроками поставки материальных ресурсов и т. п.), добавив в модель данные о сроках, количестве и запустив различные сценарии «что, если». Результаты смогут отразить как сроки и стоимость выполнения отдельных работ, так и изменение продолжительности и хода строительства объекта в целом. Модели могут быть представлены в 3D, а результаты календарного моделирования для возможности планирования и работы с ними в виде специальных отчётов календарных планов различной степени детализации.

Имитационная модель оптимизации строительства объекта в качестве пробного проекта позволяет вносить изменения в процессы или стратегию и сроки строительства объекта. Модель подсказывает, как можно сократить срок строительства, используя в качестве исходных данных информацию BIM-модели здания, и в соответствии с ними формировать календарный план, агрегируя работы по необходимым для принятия решения уровням (рис. 2).

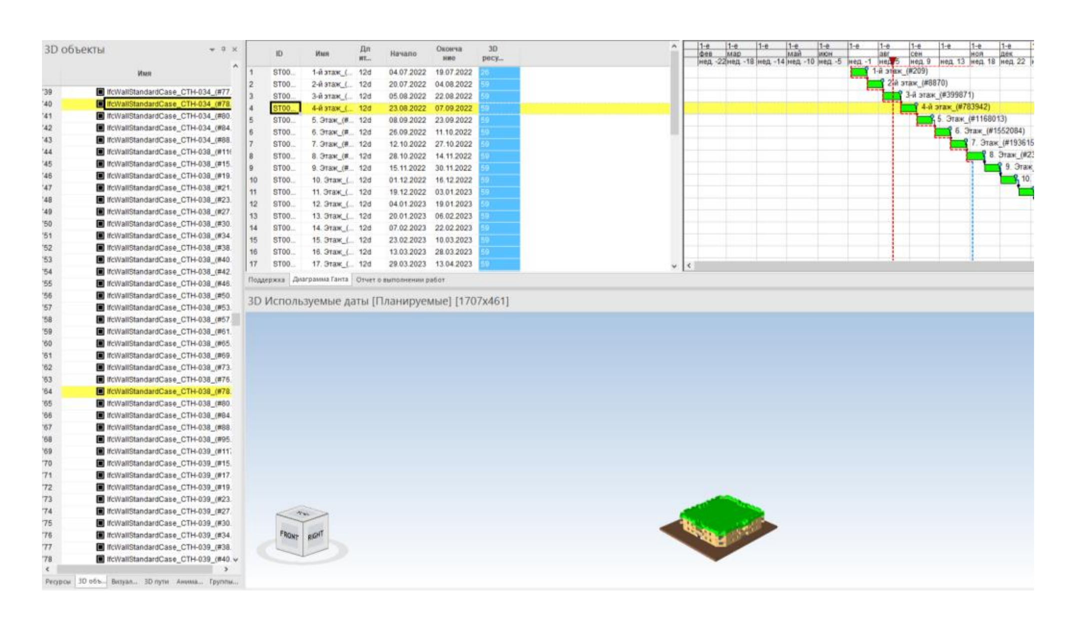


Рис. 2. Пример использования данных BIM-модели для целей календарного планирования (рисунок авторов)

Обсуждения и заключения. Создание модели цифрового двойника для исследования и прогнозирования данных — это лишь первый шаг использования технологии искусственного интеллекта для планирования и управления строительством. Реализация данного подхода к внедрению ИИ уже на первом этапе позволит решить следующие оперативные задачи:

– поддержка развития организационно-технологических процессов строительства объектов;

– моделирование различных ситуаций в единой информационной среде;

– возможность оперативного реагирования при отклонении от плановых показателей;

– увеличение времени для более качественной управленческой работы линейного персонала путем снижения неквалифицированной работы;

– возможность качественной обработки входной информации при увеличении ее объема, возможность использования различных уровней детализации и агрегирования.

Использование модели цифрового двойника, как элемента технологии искусственного интеллекта, позволит повысить эффективность календарного планирования, организационно-технологического прогнозирования строительных процессов и качества принятия управленческих решений, в том числе, оптимизацию планирования поставок материально-технических ресурсов и финансовых решений.

Библиографический список

1. Голотина, Ю. И. Факторы, влияющие на сроки строительства / Ю. И. Голотина, А. А. Рыжкова, М. С. Арутюнян // Научные труды КубГТУ. — 2018. — № 9. — URL:https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0058/2310.pdf

2. Давыдова, К. А. Факторы, влияющие на сроки строительства / К. А. Давыдова // Труды Всеросс. науч.-практ. конф. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. — С. 34–36. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35445189

3. Курочка, П. Н. Разработка моделей и механизмов организационно-технологического проектирования строительного производства / П. Н. Курочка // Диссертация доктора технических наук: 05.23.08 (Воронеж). — 2004. — С. 353.

4. Крюков, К. М. Использование технологии цифровых двойников в строительстве / К. М. Крюков // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 5 (89). — С. 517–525.

5. Clark, J. Artificial Intelligence / J. Clark, R. Perrault // Index Report. Institute for Human-Centered AI Stanford University — 2022 — P. 229.

6. Федеральный проект: «Искусственный интеллект» / Национальные проекты России. [сайт] — URL: https://национальныепроекты.рф/projects/tsifrovaya-ekonomika/p-iskusstvennyy-intellekt-p (дата обращения: 11.11.2022).

7. Колчин, В. Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве / В. Н. Колчин // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 3. — С. 250–253.

8. Wadlow, T. Feature: How Artificial Intelligence Supports the Construction Industry / T. Wadlow — 2018. URL: https://www.constructionglobal.com/equipment-and-it/feature-how-artificial-intelligence-supportsconstruction-industry

9. Лысенко, Д. А. Метод автоматизированной адаптации цифрового двойника объекта строительства / Д. А. Лысенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. — 2020. — № 4 (34). — С. 139–141. URL: http://aracy.рф/journal/isvp/4-34-2020/table-of-contents-4

10. Алексеева, Т. Р. BIM-технологии и искусственный интеллект в инфраструктурном строительстве / Т. Р. Алексеева // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2022. — № 1 (1049). — С. 52–54.

11. Викторов, М. Цифровые двойники. Основные аспекты внедрения и применения технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительстве / М. Викторов // Русский инженер. — 2021. — № 3 (72). — С. 15–16. URL: https://promweekly.ru/archive/ri/2021/RI_3_2021.pdf

12. Козлов, П. О. Цифровые двойники в строительстве на фоне развития технологий BIM / П. О. Козлов // Мат-лы 61-й студ. науч.-техн. конф. инженерно-строительного института Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ). — г. Хабаровск, 2021. — С. 275–279.

Поступила в редакцию 20.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Крюков Константин Михайлович — заведующий кафедрой «Инжиниринговое управление в строительстве» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат экономических наук, доцент, ORCID, ScopusID, kkrioukov@gmail.com

Газал Ахмед М. Х. — аспирант кафедры «Организация строительства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ahmad.07.cr7@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

К. М. Крюков — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, доработка текста, формирование выводов. А. Газал — исследование по теме работы, проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.





УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Научная статья

Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек

С. В. Георгиев ✉, А. И. Соловьева, Д. Р. Маилян

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ sergey.georgiev@bk.ru

Аннотация

Введение. В работе приведены экспериментальные данные изменения значений относительных деформаций композитных материалов внешнего армирования, замеренных при испытании железобетонных усиленных стоек. В экспериментальных исследованиях изучалось поперечное и продольное композитное усиление, состоящее из углеткани и углеламинатов (углестержней). Экспериментальные значения относительных деформаций в композитных материалах усиления дают возможность определить зоны наиболее и наименее напряжённых участков композитных материалов. Целью данного исследования является определение зон наиболее и наименее нагруженных участков композитного усиления внецентренно сжатых железобетонных стоек. Это необходимо для создания новых схем наиболее эффективных вариантов усиления. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи: изготовлены и испытаны пять железобетонных усиленных стоек; в процессе испытания были наклеены тензодатчики, которые позволили определять изменения относительных деформаций композитных материалов на всех уровнях нагружения; все данные относительных деформации композитных материалов были обработаны, проанализированы и представлены в виде графиков.

Материалы и методы. В процессе испытания железобетонных гибких стоек были получены данные по изменению относительных деформаций в композитных материалах. Измерения производились тензодатчиками базой 2 см, наклеенными вдоль волокон композитного усиления. Зоны измерения относительных деформаций выбирались согласно характеру работы композитного материала. Всего в работе рассматривались результаты испытания пяти железобетонных стоек, в которых углепластиковые ткани располагались в поперечном направлении, а углестержни и ламели — в продольном. Зоны расположения тензодатчиков на композитных материалах приведены на схемах для каждого образца в отдельности. Показания тензодатчиков представлены в виде графиков изменения относительных деформаций по отношению к уровням нагрузки. После каждого графика приведены численные значения максимальных относительных деформаций с определением характера работы композитных материалов в растянутых и сжатых гранях колонн.

Результаты исследования. В результате проведённого исследования были получены данные изменения относительных деформаций композитных материалов, при этом, датчики, расположенные на поперечных хомутах работают примерно одинаково с относительной деформацией не превышающей $1{,}8\times10^{-3}$. Такие деформации существенно ниже предельных, что является доказательством несовместной работы существующей конструкции и материала усиления на предельных стадиях нагружений. При большом зазоре между композитными хомутами элементы усиления практически не работают и предельные деформации не превышают $0{,}6\times10^{-3}$.

Обсуждение и заключения. В результате обработки изменения относительных деформаций, характеризующих уровень напряжения композитных материалов, были сделаны выводы, позволяющие утверждать, что в сжатой зоне максимальная деформация не достигает предельных значений для композитных материалов, следовательно, количество слоёв поперечного усиления можно уменьшать. Для композитных материалов, расположенных в продольном направлении, было установлено преждевременное разрушение композитных ламелей, что позволило

сделать вывод об отсутствии совместной работы материалов усиления и бетона конструкции на предельных разрушающих нагрузках.

Ключевые слова: бетон, железобетон, сталь, углепластик, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение.

Для цитирования. Георгиев, С. В. Изменение относительных деформаций в композитных материалах центрально сжатых железобетонных стоек / С. В. Георгиев, А. И. Соловьева, Д. Р. Маилян // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 24–34. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Original article

Change in Relative Deformations in Composite Materials of Centrally Compressed Reinforced Concrete Struts

Sergey V. Georgiev ✉**, Anastasia I. Solovyeva, Dmitriy R. Mailyan**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Abstract

Introduction. The paper presents experimental data on the change in the values of relative deformations of composite materials of external reinforcement, measured during testing of reinforced concrete pillars. In experimental studies, transverse and longitudinal composite reinforcement was studied, consisting of carbon fabric and carbon laminates (carbon rods). The experimental values of relative strains in composite reinforcement materials make it possible to determine the zones of the most and least stressed sections of composite materials. The purpose of this study is to determine the zones of the most and least loaded areas of composite reinforcement of eccentrically compressed reinforced concrete pillars. This is necessary to create new schemes for the most efficient amplification options. To achieve this goal, the following tasks were completed: five reinforced concrete pillars were manufactured and tested; during the test, strain gauges were glued, which made it possible to determine changes in the relative deformations of composite materials at all levels of loading; all data of relative deformations of composite materials were processed, analyzed and presented in the form of graphs.

Materials and methods. In the process of testing reinforced concrete flexible struts, data were obtained on the change in relative deformations in composite materials. The measurements were made by strain gauges with a base of 2 cm glued along the fibers of the composite reinforcement. The zones for measuring relative deformations were chosen according to the nature of the work of the composite material. In total, the work considered the results of testing five reinforced concrete racks, in which carbon fiber fabrics were located in the transverse direction, and carbon rods and lamellas were located in the longitudinal direction.

Results. As a result of the study, data on changes in the relative deformations of composite materials were obtained, while the sensors located on the transverse clamps work approximately the same with a relative deformation not exceeding 1.8×10^{-3}. Such deformations are significantly lower than the limiting ones, which is evidence of the incompatibility of the existing structure and the reinforcement material at the limiting stages of loading. With a large gap between the composite clamps, the reinforcement elements practically do not work and the limiting deformations do not exceed 0.6×10^{-3}.

Discussion and Conclusions. As a result of processing the change in relative strains characterizing the stress level of composite materials, conclusions were drawn that allow us to state that in the compressed zone the maximum strain does not reach the limit values for composite materials, therefore, the number of transverse reinforcement layers can be

reduced. For composite materials located in the longitudinal direction, premature destruction of composite lamellas was established, which made it possible to conclude that there was no joint work of reinforcement materials and concrete of the structure at ultimate breaking loads.

Keywords: concrete, reinforced concrete, steel, carbon fiber, composite reinforcement, reinforcement, strain, stress.

For citation. S.V. Georgiev, A.I. Solovyeva, D.R. Mailyan. Change in relative deformations in composite materials of centrally compressed reinforced concrete struts. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 24–34. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-24-34

Введение. Вопросами усовершенствования строительства новых и восстановления (модернизации) существующих несущих конструкций зданий и сооружений в России занимались такие учёные как Шилин А. А., Мухамедиев Т. А., Маилян Д. Р. и др., работы которых, отразились в [1–3]. На сегодняшний день обществу необходимо предоставить новые системы усиления, позволяющие в короткие сроки без существенных внешних изменений произвести усиление конструкций. От решения поставленной задачи зависит и дальнейший рост промышленности других сфер.

При необходимости усиления несущих конструкций зданий и сооружений активно используются новые методы на основе использования композитных материалов [4, 5]. Наибольшую эффективность показали углепластиковые системы усиления, отличающиеся высокими прочностными свойствами и схожим с металлом модулем упругости [6], обеспечивающим совместную работу материалов усиления и бетона. Однако композитные материалы отличаются от традиционных (бетона и металла) своей высокой стоимостью. Поэтому все работы, направленные на поиски наиболее рационального использования материалов усиления, являются актуальными и перспективными.

В рамках диссертационной работы по определению эффективности композитных материалов при усилении внецентренно сжатых гибких железобетонных стоек, программа которой представлена в статье [7], были произведены замеры относительных деформаций композитных материалов тензодатчиками для дальнейшего определения напряжения в материалах усиления. Цель данного исследования заключается в определении наиболее нагруженных элементов усиления и, наоборот, выявлении неэффективных для дальнейшей разработки новых схем усиления внецентренно сжатых железобетонных конструкций.

Материалы и методы. В анализ данной работы входят результаты экспериментальных исследований. Результаты ранее проделанных работ по выявлению эффективности композитных материалов представлены в работах [8–10].

В данной работе рассматриваются центрально сжатые стойки, усиленные композитными материалами в поперечном направлении. Также приведены результаты пробных испытаний, не рекомендуемых сводом правил по усилению композитными материалами, по выявлению эффективности композитных материалов, расположенных в продольном направлении в сжатой зоне бетона, на увеличение прочности стоек.

Полная информация о характеристиках опытных образцов, методики усиления и испытания приведены в работах [11–13].

Ниже приведены основные данные опытных образцов для понимания вопроса исследования.

Габаритные размеры опытных образцов составляли 125(h)×250×1200 (мм). Внутренний металлический каркас был выполнен из 4 стержней ØА500, поперечное армирование было выполнено из вязаных хомутов Ø6 В500. На приопорных участках стоек были установлены по шесть металлических сеток для предотвращения смятия.

Усиление стоек выполнялось из углеткани в виде хомутов шириной 50 или 100 мм, в качестве продольного усиления использовались углеламинаты габаритами 50×1,4 мм или углестержни диаметром 8 мм.

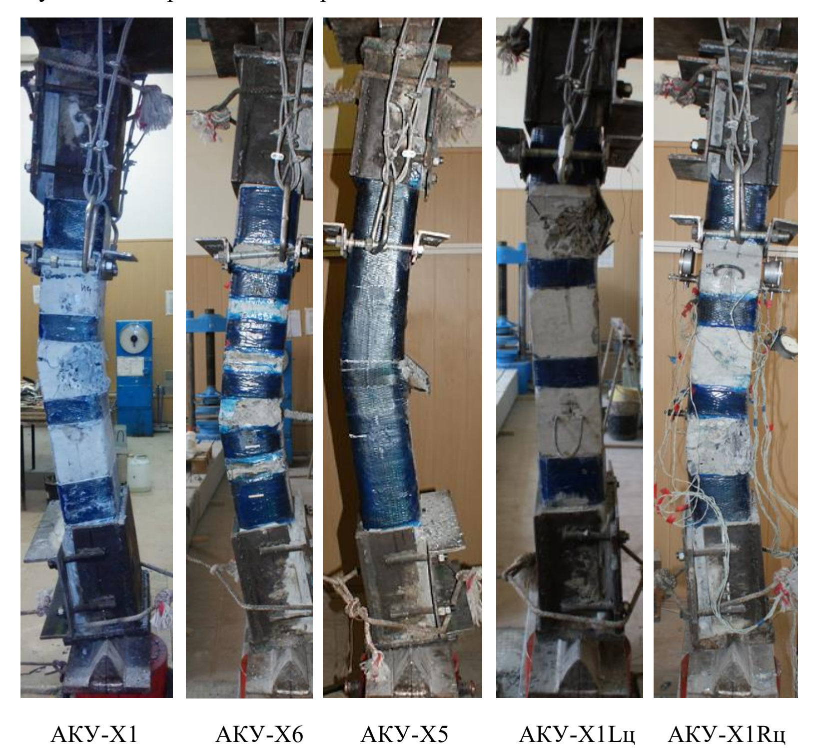
Испытание проводилось ступенчато возрастающей нагрузкой, уровнями, равными 10 % от разрушающей нагрузки, с выдержкой по 10 минут на каждом этапе.

Железобетонные стойки испытывались при центральном загружении. Нагрузка передавалась через специально изготовленные ножи, которые устанавливались в проделанные прорези на оголовниках. Металлические оголовники надевались на оба конца стоек. Между пластиной оголовника и конструкцией заливался цементный раствор с целью равномерной передачи нагрузки. Центральное сжатие контролировалась индикаторами, наклеенными на тело бетона, с базой 30 см, которые определяли относительные деформации бетона. Установка колонн осуществлялось таким образом, что относительные деформации бетона, вплоть до нагрузки, составляющей 30 % от разрушающей, развивались равномерно.

В комплексном исследовании [14] влияния эффективности композитных материалов на увеличение прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых конструкций, в рамках которого выполнялось определение деформаций в композитных материалах, были определены относительные деформации бетона и композитов, поэтому для ряда колонн, на рис. 2–6 на схемах расположения тензодатчиков нумерация начинается не с единицы.

Все образцы испытывались при разных вариантах усиления. Так как образцы данной работы являются частью большого научного исследования [6], ниже представлен краткий шифр для опытных образцов.

Шифр образцов: А — обозначает, что стойки центрально-сжатые; К — имеют длину 1200 мм; У — усилена композитными материалами; Х — имеется наличие хомутов. Цифры 1, 2, 5 и 6, находящийся в индексе буквы Х, обозначают шаг композитных хомутов, а именно 190, 95, 0 и 64 мм соответственно; L — означает наличие продольного усиления, которое состоит из двух или четырех ламелей; R — наличие углестержней, расположенных в продольном направлении; индексы (р, с, ц) к букве L или R обозначают, что ламели или углестержни находятся в растянутой, сжатой зоне и с двух сторон соответственно. Схемы расположения и шаг хомутов композитного усиления приведены на рис. 1–6.



АКУ-Х1 АКУ-Х6 АКУ-Х5 АКУ-Х1Lц АКУ-Х1Rц

Рис. 1. Характер разрушения усиленных коротких образцов при осевом эксцентриситете приложения нагрузки e_0=0

Результаты исследования. Ниже представлены экспериментальные данные развития деформаций по отношению к силе опытных образцов. На рис. 2–5 слева указывается схема расположения тензодатчиков (Т), справа — график изменения относительных деформаций композитных материалов εf в зависимости от силы N.

АКУ–X_1

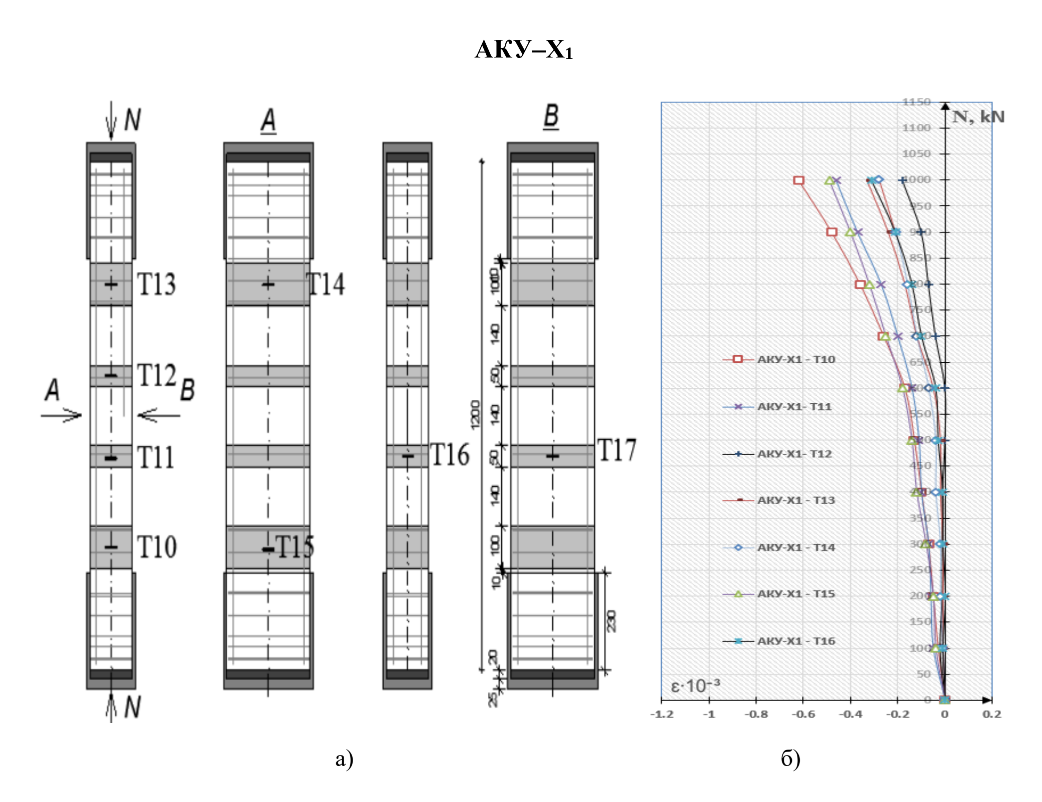


Рис. 2. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра АКУ-X_1 при e_0=0 и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε-N) (рисунок авторов)

АКУ–X_1 — центрально сжатая стойка, усиленная в поперечном направлении хомутами, расстояние в свету между которыми равно 140 мм. Хомуты, расположенные около оголовников, имеют ширину 100 мм, в середине колонны расположены хомуты шириной 50 мм. Всё поперечное усиление выполнялось из трех слоев углеткани. В процессе испытания измерялись относительные деформации, возникающие в материале усиления. Учитывая отсутствие на момент проведения опытов данных о распределении напряжений в поперечной арматуре хомутов, тензодатчики наклеивались на все четыре стороны конструкции. Четыре тензодатчика устанавливались на ребро конструкции, при этом определялась деформация во всех четырех хомутах.

Такое решение было сделано для определения распределения напряжений во всех хомутах в зависимости от высоты расположения хомута на колонне.

Остальные тензодатчики устанавливались на противоположную и боковые грани с целью фиксированная напряжения в хомуте, в месте разрушения колонны.

Согласно показаниям тензодатчиков можно сделать следующие выводы.

Во всех хомутах наблюдаются небольшие относительные деформации в композитных материалах. Значения варьируются от $0{,}2\times10^{-3}$ до $0{,}6\times10^{-3}$.

Относительные деформации в хомутах изменяются до нагрузки 0,6Nult по касательной, при этом предельные деформации не превышает $0{,}1\times10^{-3}$. При уровнях нагрузки от 60 до 100 % наклон касательной меняется.

Можно сделать вывод, что композитные хомуты до уровня нагрузки 60 % не включаются в работу, а при превышении 60 % начинают вступать в работу вплоть до разрушения бетона между хомутами. В работе [14] приведён сравнительный анализ прочности данной стойки с аналогичной эталонной, не усиленной, при этом прироста прочности не было зафиксировано, что в принципе и подтверждается показаниями тензодатчиков.

В ребре конструкции, на которой наклеены 4 тензодатчика по всей длине колонны, относительные деформации разные и зависят от расположения относительно разрушенной зоны бетона, но расхождение относительных деформаций не превышает $0{,}4\times10^{-3}$.

Тензодатчик под номером 17 вышел из строя в процессе испытания по техническим причинам при уровне нагрузки примерно 50 % от разрушающей.

Согласно показаниям тензодатчиков можно сделать вывод, что данный шаг композитных хомутов слишком большой, и бетон конструкции разрушается между хомутами.

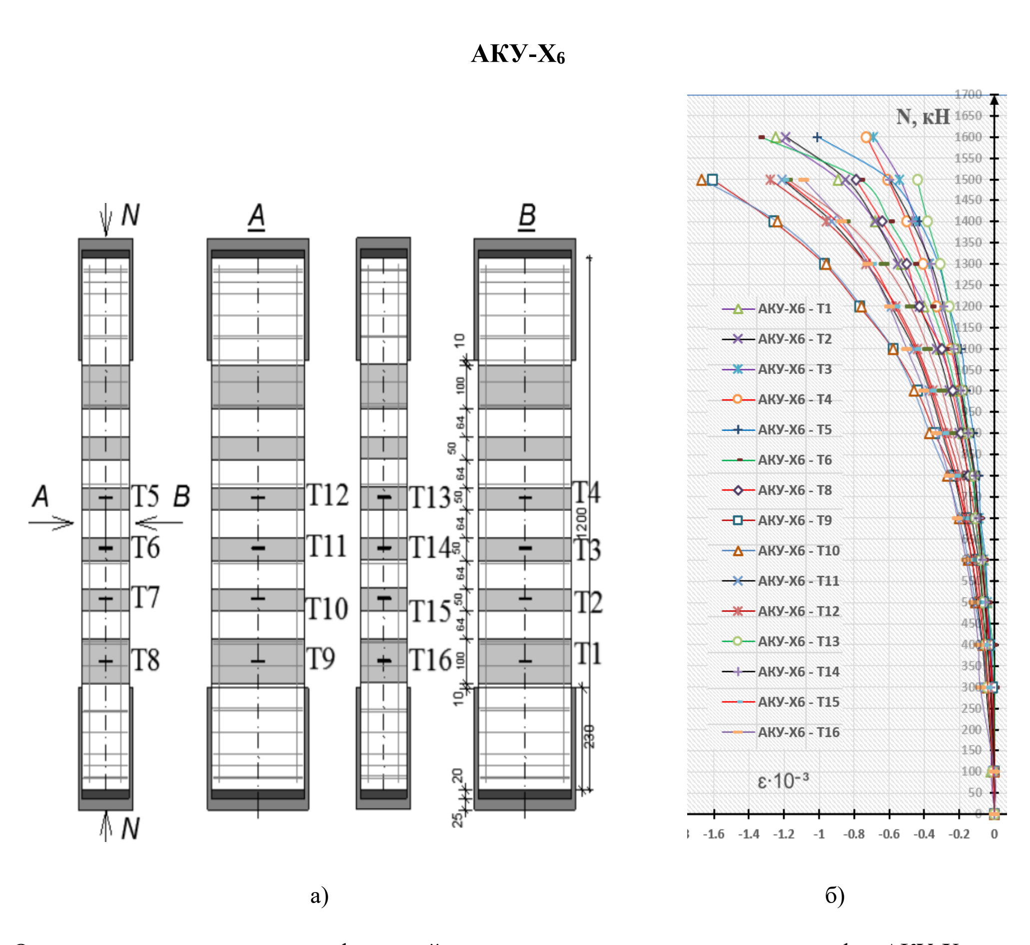


Рис. 3. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ-X_6 при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

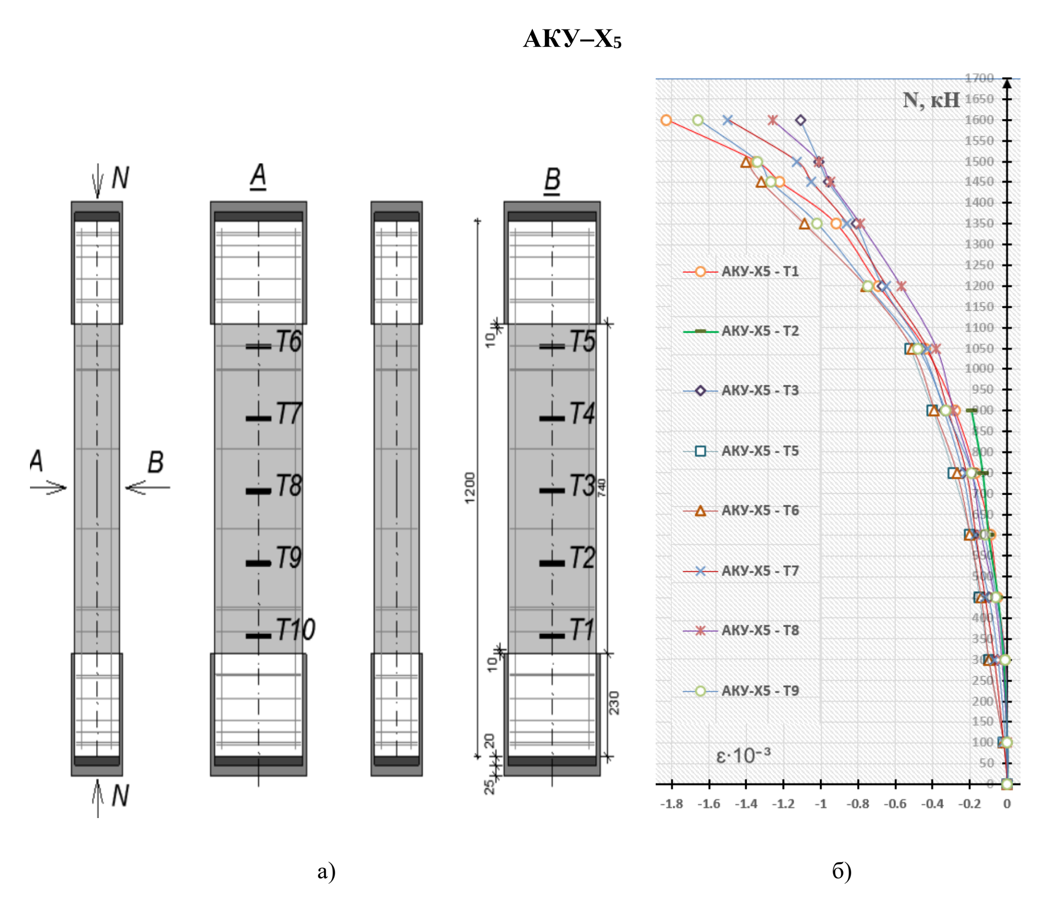
АКУ–X_6 — железобетонная стойка, усиленная композитными материалами с расстоянием в свету, равным 64 мм. На колонну было наклеено 16 тензодатчиков таким образом, чтобы определить деформации композитных материалов с 4 сторон хомута.

Результаты показания тензодатчиков следующие: в области разрушения колонны, где установлены тензодатчики под номером 9 и 10, относительные деформации композитных материалов составили $1{,}6\times10^{-3}$ и $1{,}7\times10^{-3}$.

На противоположной грани, на хомуте, где установлены тензодатчики 1 и 2, относительные деформации составляли $1{,}3\times10^{-3}$. Примерно такое же значение деформаций показали тензодатчики, наклеенные в зоне разрушения на ребрах колонн.

По мере отдаления от зоны разрушения, судя по показаниям тензодатчиков под номером 11 и 12 (в разрушенной грани) и 14 и 13 (в ребре тех же хомутов), относительные деформации уменьшаются тем больше, чем дальше от зоны разрушения. Значения относительных деформаций варьируются от $0{,}4\times10^{-3}$ до $1{,}2\times10^{-3}$.

АКУ–Х$_5$



а) б)

Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–Х$_5$ при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

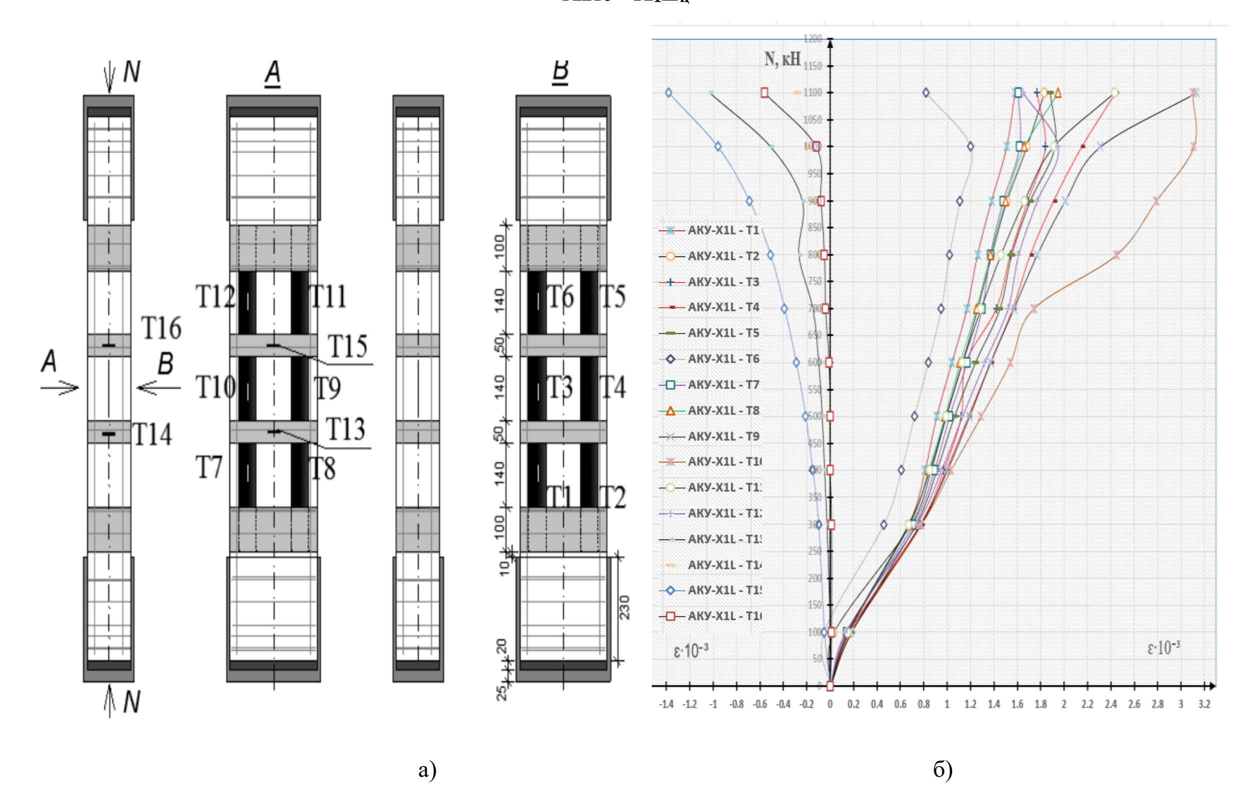
АКУ–Х$_5$ — железобетонная, усиленная обоймой, стойка. Обойма выполнялась из углеткани в 3 слоя. Тензодатчики были наклеены равномерно по длине колонн на наиболее широких гранях.

Тензодатчики под номером 4 и 10 были по техническим причинам выведены из строя при уровне нагрузки, не превышающей 50 %. Показания тензодатчиков номер 2 и 5 перестали определяться при уровнях нагрузки 900 и 1050 кН соответственно.

Согласно полученным относительным деформациям в композитных материалах можно сделать следующие выводы: вне зависимости от того, куда была выгнута стойка в процессе испытания, относительные деформации бетона в среднем были равны от $1{,}1\times10^{-3}$ до $1{,}8\times10^{-3}$. При этом наибольшие деформации были внизу опытного образца, согласно показанию тензодатчика номер 1.

Из этого можно сделать вывод, что напряжения в усиленном образце развивались равномерно вплоть до разрушения.

АКУ–$X_1L_ц$



а) б)

Рис. 5. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–X_1Lц при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε–N) (рисунок авторов)

АКУ–X_1Lц — железобетонная, усиленная композитами в продольном и поперечном направлении, стойка. В качестве продольного усиления использовались углепластиковые ламели шириной 5 см и толщиной 1,4 мм. Ламели наклеивались на специальную высокопрочную шпаклёвку.

В качестве поперечного усиления использовались хомуты по варианту стойки АКУ-X1. В основном тензодатчики были наклеены на продольном усилении. Четыре тензодатчика были наклеены на поперечные хомуты, расположенные в центре стойки, на широкой и узкой грани конструкции.

Результаты показаний тензодатчиков: тензодатчики номер 15 и 13 были наклеены на хомуты, расположенные в зоне разрушения. Их относительные деформации варьировались от 1×10^{-3} до $1{,}4\times10^{-3}$. В ребре показания тензодатчиков были существенно меньше и находились в области от $0{,}3\times10^{-3}$ до $0{,}57\times10^{-3}$.

Анализ результатов тензодатчиков в продольных углепластиковых ламелях показал, что относительные деформации варьировались от 1,6×10-3 до 2,4×10-3, тензодатчики под номером 9 и 10, которые находились в зоне разрушения колонны, показали относительные деформации, превышающие 3,0×10-3.

Стоит отметить, что в процессе эксперимента было зафиксировано разрушение ламелей с последующим выпучиванием и отрывом от тела бетона.

АКУ–X_1Rц — железобетонная стойка, усиленная хомутами по аналогии со стойкой АКУ–X_1. Дополнительно были установлены с обеих сторон, с наиболее широкой грани колонны, по 2 углестержня. В теле бетона были прорезаны штробы, в которых были установлены на высокопрочной шпаклёвке углестержни. Тензодатчики под номерами 1, 3, 4, 6, 7, 9 были наклеены в местах установки углестержней. Так как углестержни были утоплены в тело бетона и сверху зашпаклёваны высокопрочной шпаклёвкой, то тензодатчики наклеивались на шпаклёвку, следовательно определить истинные деформации в композитном материале не представляется возможным.

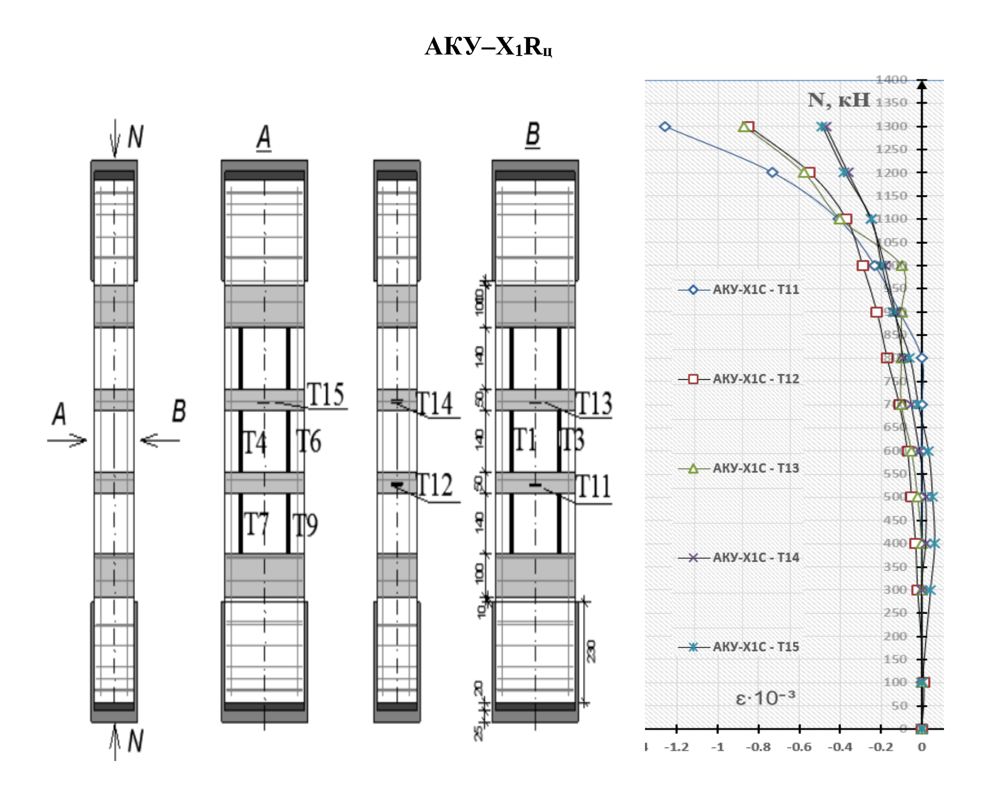


Рис. 6. Определение относительных деформаций в композитных материалах стоики шифра АКУ–$X_1R_ц$ при e_0=0 см и гибкости λ_h=10: а) схема расположения тензодатчиков; б) графики определения относительных деформаций композитных материалов (ε-N) (рисунок авторов)

Согласно показаниям тензодатчиков, наклеенных на поперечное усиление, наибольшие деформации были в хомуте в зоне разрушения (тензодатчик номер 11). Относительная деформация композита была равна $1{,}27\times10^{-3}$.

Показания датчиков 12 и 13 практически совпали. Хомут, на который был наклеен тензодатчик 13, находился на грани разрушения колонны, а датчик под номером 12 находился на хомуте в зоне наибольшего разрушения конструкции, то есть в нижней части колонны. Относительные деформации были равны $0{,}9\times10^{-3}$.

Датчики под номером 14 и 15 находились в наиболее удалённой зоне от разрушения из тех хомутов, на которых замерялись деформации, на противоположной грани и на ребре конструкции их деформации были меньше всего и составляли $0{,}5\times10^{-3}$.

Обсуждение и заключения. Согласно результатам деформаций в композитных материалах можно сделать следующие выводы:

– наибольшие деформации в хомутах поперечного усиления наблюдаются на наиболее широкой грани колонн;

– значение предельных относительных деформаций зависит от шага композитных хомутов. Установлена закономерность: чем меньше шаг хомутов, тем больше деформации в композитах;

– деформации в композитных материалах в обойме развивается практически равномерно, но предразрушающие нагрузки растут там, где зона бетона наиболее слабая.

Библиографический список

1. Шилин, А. А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. М. Картузов // ОАО «Издательство Стройиздат». — 2007. — С. 184.

2. Мухамедиев, Т. А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами / Т. А. Мухамедиев // Бетон и железобетон. — 2013. — № 3. — С. 6–8.

3. Польской, П. П. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 4–1 (31). — С. 138.

4. Шилин, А. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. М. Картузов // Стройиздат. — 2004. — С. 144.

5. Чернявский, В. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / В. А. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Жилищное строительство. — 2003. — № 3. — С. 15–16.

6. Устинов, Б. В. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) / Б. В. Устинов, В. П. Устинов // Известия вузов. Строительство. — 2009. — № 11–12. — С. 118–125.

7. Польской, П. П. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика / П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–3. — С. 662–666.

8. Polskoy, P. The strength of compressed structures with cfrp materials reinforcement when exceeding the cross-section size / P. Polskoy, D. Mailyan, S. Georgiev, V. Muradyan // E3S Web of Conferences. — 2018. — С. 02060.

9. Польской, П. П. О несущей способности усиленных коротких стоек при больших эксцентриситетах / П. П. Польской, Д. Р. Маилян, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 4–1. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2631.

10. Маилян, Д. Р. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2 (25). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673.

11. Польской, П. П. Методики усиления композитными материалами и испытания железобетонных элементов / П. П. Польской, А. Михуб, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 2 (25). — С. 112.

12. Маилян, Д. Р. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–3. — С. 667–670.

13. Маилян, Д. Р. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек / Д. Р. Маилян, П. П. Польской, С. В. Георгиев // Научное обозрение. — 2014. — № 10–2. — С. 415–418.

14. Польской, П. П. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов / П. П. Польской, С. В. Георгиев // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134.

Поступила в редакцию 16.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Георгиев Сергей Валерьевич – доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, sergey.georgiev@bk.ru.

Соловьева Анастасия Ивановна – инженер и ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), магистр, 98rosignol@mail.ru.

Маилян Дмитрий Рафаэлович – профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dmailyan868@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Георгиев С.В. — анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов. Д. Р. Маилян — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов. А. И. Соловьева — выполнение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



УДК 697.34; 004.9
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42

Научная статья



Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах ее жизненного цикла

А. Л. Тихомиров ✉, А. П. Пирожникова

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ a.l.tikhomirov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Приводятся данные по элементам систем теплоснабжения Российской Федерации (источникам тепла, тепловым сетям) а также их основные энергетические характеристики. Указаны основные проблемы в отрасли. Сделан вывод о необходимости оптимизация работы систем теплоснабжения во всех ее звеньях и на всех этапах жизненного цикла.

Материалы и методы. Для оптимального управления теплоэнергетическими системами авторы считают целесообразным создание на каждом этапе жизненного цикла цифровой информационной модели каждого элемента системы, в том числе:

– трехмерную инженерную цифровую модель местности;
– трехмерную инженерную цифровую модель тепловых сетей, учитывающую смежные коммуникации и сооружения;
– эксплуатационную цифровую модель системы теплоснабжения на платформе геоинформационного программного комплекса Zulu21.

Приведена технология обмена данными в IFC формате между программными комплексами. Указана необходимость верификации эксплуатационной модели с использованием данных натурных измерений на физической модели системы теплоснабжения.

Результаты исследования. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление).

Программный пакет SCADA в online режиме собирает необходимую информацию (температура, давление, расход теплоносителя) с датчиков, установленных в характерных точках системы. Вся информация передается на ZuluOPC-программный комплекс со встроенной поддержкой технологии OPC для получения данных со SCADA-системы. Полученные данные поступают в программный комплекс ZuluGis, включающий модуль ZuluThermo, с загруженной цифровой информационной моделью системы теплоснабжения. В модуле происходит расчет фактических тепловых и гидравлических режимов системы. Данные по оптимальному и фактическому теплогидравлическим режимам передаются блок нейроуправления для сравнения и принятия управленческого решения. Принятое решение передается на соответствующий контроллер для инициализации действий по изменению того или иного параметра.

Обсуждение и заключения. Предложена технология разработки цифровой информационной модели для элементов системы теплоснабжения на всех этапах ее жизненного цикла. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление). Применение

интеллектуального управления позволяет повысить качество принимаемых решений, значительно повысить энергетическую эффективность систем теплоснабжения и качество оказания услуг конечному потребителю.

Ключевые слова: система теплоснабжения, теплогидравлический режим, эксплуатационная модель, нейроуправление, цифровая информационная модель, жизненный цикл.

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам за помощь.

Для цитирования. Тихомиров, А. Л. Разработка информационной модели системы теплоснабжения на различных этапах ее жизненного цикла / А.Л. Тихомиров, А. П. Пирожникова // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 35–42. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42

Original article

Development of an Information Model of a Heat Supply System at Various Stages of the Life Cycle

Alexey L. Tikhomirov ✉, **Anastasia P. Pirozhnikova**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ a.l.tikhomirov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Data on elements of heat supply systems of the Russian Federation (heat sources, heating networks) are given as well as the main energy characteristics. The main problems in the industry are indicated. It is concluded that it is necessary to optimize the operation of heat supply systems in all its links and at all stages of the life cycle.

Materials and Methods. For optimal control of thermal power systems, the authors consider it expedient to create a digital information model of each element of the system at each stage of the life cycle, including:

– three-dimensional engineering digital terrain model;

– three-dimensional engineering digital model of heating networks, taking into account adjacent communications and structures;

– operational digital model of the heat supply system on the platform of the geoinformation software complex Zulu21.

The technology of data exchange in IFC format between software complexes is given. The necessity of verification of the operational model using the data of field measurements on the physical model of the heat supply system is indicated.

Results. The creation of a digital information 6D model of the heat supply system allows you to move to a higher level: intelligent dynamic control of a complex energy system (neurocontrol).

The SCADA software package in online mode collects the necessary information (temperature, pressure, coolant flow) from sensors installed at characteristic points of the system. All information is transmitted to Zulu, a software package with built-in support for OPC technology to receive data from a SCADA system. The received data is fed into the ZuluGis software package, which includes the ZuluThermo module, with a loaded digital information model of the heat supply system. The actual thermal and hydraulic modes of the system are calculated in the module. Data on the optimal and actual thermal-hydraulic modes are transmitted to the neurofeedback unit for comparison and management decision-making. The decision is transmitted to the appropriate controller to initialize actions to change a parameter.

Discussion and Conclusions. A technology for developing a digital information model for elements of a heat supply system at all stages of its life cycle is proposed. The creation of a digital information 6D model of the heat supply system allows you to move to a higher level: intelligent dynamic control of a complex energy system (neurocontrol). The use of intelligent control makes it possible to improve the quality of decisions made, significantly increase the energy efficiency of heat supply systems and the quality of services provided to the end user.

Keywords: heat supply system, thermohydraulic mode, operational model, neurocontrol, digital information model, life cycle.

For citation. A. L. Tikhomirov, A. P. Pirozhnikova. Development of an Information Model of a Heat Supply System at Various Stages of the Life Cycle. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 35–42. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-35-42

Введение. Российская система теплоснабжения является самой большой в мире, обеспечивая около 40 % мирового централизованного производства тепловой энергии. Согласно докладу Министерства энергетики Российской Федерации «О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 году», в стране работает 572 тепловых электростанций мощностью от 500 кВт и выше и 77,3 тыс. отопительных котельных. В 2020 году источниками тепла в России было произведено 1221,4 млн. Гкал тепловой энергии. Протяженность тепловых сетей в двухтрубном исчислении составляет 167,4 тыс. км. [1, 2]

Ориентация российской энергетики на теплофикацию и централизованное теплоснабжение как основной способ удовлетворения тепловых потребностей населенных пунктов и промышленных центров технически и экономически себя оправдали. Однако в работе систем централизованного теплоснабжения и теплофикации имеется много недостатков, неудачных технических решений, неиспользованных резервов. На конец 2020 года общая протяженность тепловых сетей в РФ, нуждающихся в замене в соответствии со сроками эксплуатации в двухтрубном исчислении составила 51,5 тыс. км., в том числе протяженность ветхих сетей (т.е. имеющих износ по данным технической инвентаризации более 60 %) составила 38,8 тыс. км. [3, 4] Изменение протяженности тепловых сетей, требующих замены и ветхих приведено на рис. 1.

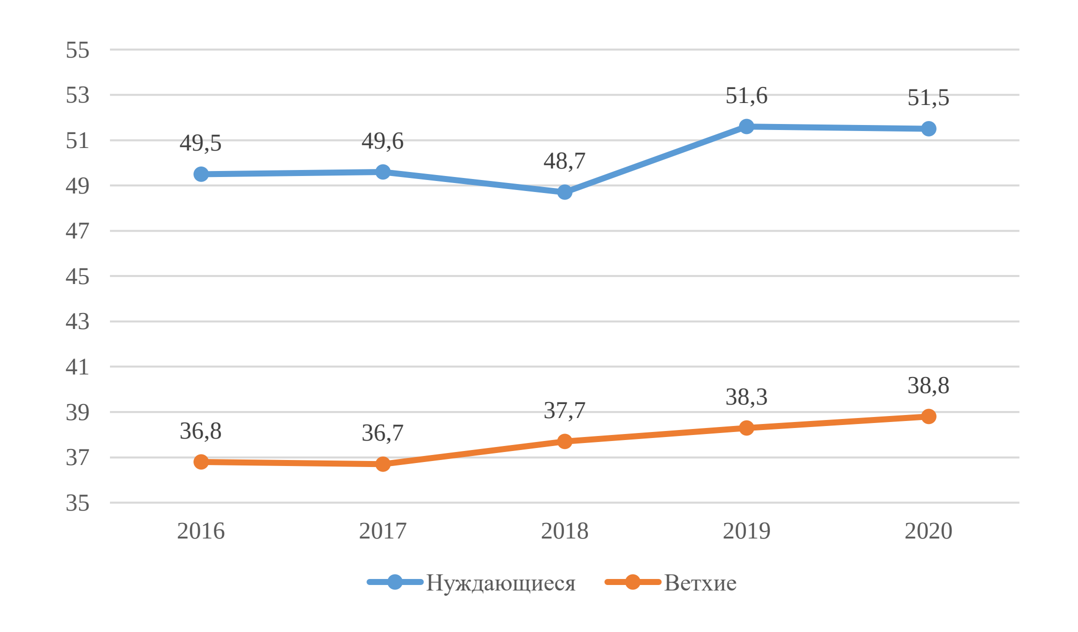


Рис. 1. Изменение протяженности тепловых сетей, требующих замены и ветхих (рисунок авторов)

Столь большое количество изношенных тепловых сетей приводит к высокой аварийности, сверхнормативным тепловым потерям через изоляцию и утечкам теплоносителя [5].

Перспективное развитие центрального теплоснабжения наряду с эволюционированием традиционных технологий производства, передачи и потребления тепловой энергии предусматривает переход на качественно новый уровень их энергетической, экологической и экономической эффективности. Оптимизация работы систем теплоснабжения во всех ее звеньях и на всех этапах жизненного цикла является первоочередной задачей теплоэнергетики страны [6, 7].

Материалы и методы. Системы централизованного теплоснабжения, включающие источники тепловой энергии, тепловые сети-системы трубопроводов и сооружений на них, предназначенные для транспортировки теплоносителя, конечные потребители тепловой энергии, являются сложными инженерными системами. Для оптимального управления этими системами авторы считают целесообразным создание на каждом этапе жизненного цикла цифровой информационной модели каждого элемента - совокупности взаимосвязанных инженерно-технических и инженерно-технологических данных об объекте капитального строительства, представленных в цифровом объектно-пространственном виде [8, 9, 10, 11, 12].

В соответствии с СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла» жизненный цикл здания или сооружения — это период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения.

Первым этапом жизненного цикла являются инженерные изыскания, в том числе – геодезические. Изыскания проводятся электронными геодезическими приборами, в результате получаем трехмерную инженерную цифровую модель местности [13].

Вторым этапом является проектирование. Трехмерное проектирование тепловых сетей предусматривает учет смежных коммуникаций и сооружений. Проектирование осуществляется в CAD программах, при этом топографической подложкой является инженерная цифровая модель местности. Для проектирования линейных инфраструктурных объектов, к каким относятся тепловые сети, широко применялась программа Civil 3D, компании Autodesk на платформе Autocad. В связи с уходом компании с российского рынка, авторы рекомендуют для проектирования инфраструктурных объектов программу Geoni CS, российского разработчика CS Development, работающей на платформе nanoCad22 [14, 15].

Третьим этапом является строительство объектов системы, с использованием цифровой рабочей документации. В ходе строительства, по согласованию с проектной организацией, могут быть внесены изменения в проектную документацию. Именно исполнительная документация является основой для создания цифровой эксплуатационной модели [16].

Следует отметить, каждому типу цифровой информационной модели на каждом этапе жизненного цикла соответствует определенный уровень проработки - минимальный объем геометрических, пространственных, количественных, а также любых атрибутивных данных, необходимых для решения задач информационного моделирования на конкретной стадии жизненного цикла объекта [17, 18].

Четвертый этап-создание эксплуатационной модели (6D модель) в соответствии с классификацией СП 331.1325800.2017 «Информационное моделирование в строительстве. Правила обмена между информационными моделями объектов и моделями, используемыми в программных комплексах» [15, 19, 20].

Авторы предлагают передать геометрическую информацию по объектам тепловых сетей, используя блок-схему, приведенную на рис. 2.

Передача данных должна производиться в IFC-формате, формате отраслевых базовых классов данных с открытой спецификацией для совместного использования их в строительстве и управлении объектами с выполнением требований интероперабельности. В качестве Программного комплекса Б предлагается использовать программный комплекс Zulu21 с модулем ZuluThermo разработки отечественной компании «Политерм». Комплексом Zulu21 на базе графической 3D модели тепловой сети будут созданы топологические связи объектов системы теплоснабжения (с использованием теории графов). Последующее создание семантических баз данных по всем элементам системы приведет к созданию полноценной эксплуатационной 6D модели. Важным моментом создания эксплуатационной модели является ее верификация на соответствие физическому аналогу. Верификация проводится с использование данных измерений основных параметров в характерных точках физической системы теплоснабжения [21–27].

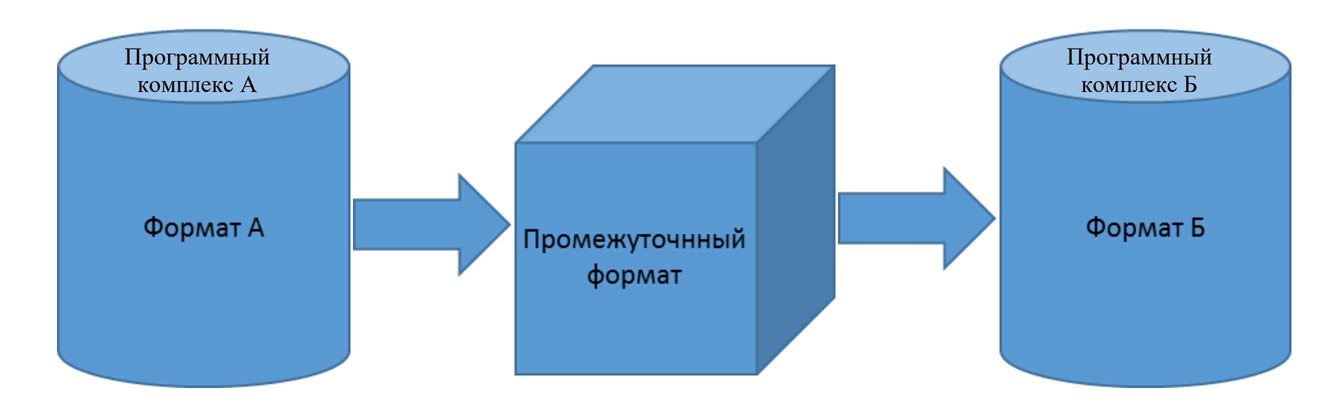


Рис. 2. Блок-схема передачи данных с использованием промежуточного формата обмена (рисунок авторов)

Результаты исследования. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволяет перейти на более высокий уровень: интеллектуальное динамическое управление сложной энергетической системой (нейроуправление).

Организация системы управления представлена на блок-схеме, приведенной на рис. 3.

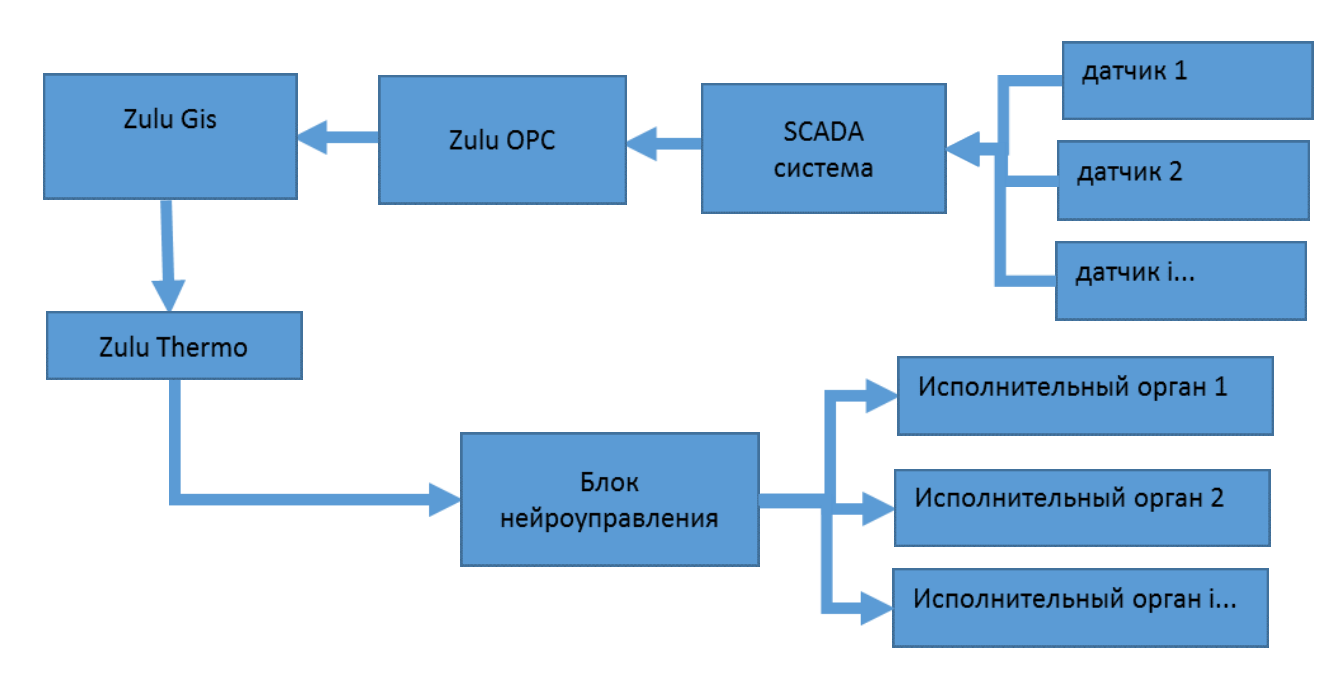


Рис. 3. Организация системы управления (рисунок авторов)

Принцип работы системы управления заключается в следующем:

Программный пакет SCADA (Supervisori Control And Data Acquisition-диспетчерское управление и сбор данных) в online режиме собирает необходимую информацию (температура, давление, расход теплоносителя) с датчиков, установленных в характерных точках системы. Вся информация передается на ZuluOPC-программный комплекс со встроенной поддержкой технологии OPC (Open Platform Communications) для получения данных со SCADA-системы. Полученные данные поступают в программный комплекс ZuluGis, включающий модуль ZuluThermo, с загруженной цифровой информационной моделью системы теплоснабжения. В модуле происходит расчет фактических тепловых и гидравлических режимов системы. Данные по оптимальному и фактическому теплогидравлическим режимам передаются в блок нейроуправления для сравнения и принятия управленческого решения. Принятое решение передается на соответствующий контроллер для инициализации действий по изменению того или иного параметра [28–29].

Обсуждение и заключения. Предложена технология разработки цифровой информационной модели для элементов системы теплоснабжения на всех этапах ее жизненного цикла. Создание цифровой информационной 6D модели системы теплоснабжения позволит перейти на более высокий уровень: интеллектуального динамического управления сложной энергетической системой (нейроуправление). Применение интеллектуального управления будет способствовать значительному повышению качества принимаемых решений, энергетической эффективности систем теплоснабжения и качеству оказания услуг конечному потребителю.

Библиографический список

1. Чурашев, В. Н. Оценка потенциала теплосбережения: региональные особенности и возможности ТЭБ / В.Н. Чурашев, В.М. Маркова // Труды IX Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью». В 4 т. Т. 1. — Новосибирск: Сибирская государственная геодезическая академия, 2013. — С. 114–119.

2. Состояние сетей и системы теплоснабжения. Режим доступа: http://nsk.novosibdom.ru/node/2860 (дата обращения 15.11.2022).

3. Централизованное теплоснабжение как повод для беспокойства. Режим доступа: http://academcity.org/content/centralizovannoe-teplosnabzhenie-kak-povod-dlyabespokoystva (дата обращения: 10.11.2022).

4. Сердюков, О. В. Программно-технический комплекс «Торнадо-N» для объектов теплоэнергетики / О. В. Сердюков // Новое в российской электроэнергетике. — 2011. — № 9. — С. 24–30.

5. Пасичко, С. И. Системы теплоснабжения. Выбор оптимальных направлений развития / С. И. Пасичко, Е. А. Халецкая, А.Г. Колиенко // Новости теплоснабжения. — 2002. — № 24.08.

6. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71570570/ (дата обращения 05.11.2022).

7. Тихомиров, А. Л. Информационное моделирование объектов инженерной инфраструктуры / А. Л. Тихомиров, А.Ю. Бабушкин // Мат-лы Всеросс. (нац.) науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы науки и техники». — Ростов-на-Дону, 2021. — С. 287–288.

8. Бабушкин, А. Ю. Разработка алгоритма автоматизации тепловой сети / А. Ю. Бабушкин // Наука молодых — будущее России. — 2021. — С. 214–215.

9. Тихомиров, А. Л. Верификация электронной модели тепловой сети по параметру "эквивалентная абсолютная шероховатость" / А.Л. Тихомиров, Н.А. Ананьев // Инженерный вестник Дона. — 2020. — №. 3 (63). — С. 12.

10. Красильникова К. В. Модели интеграции информационных ресурсов региональной системы жилищно-коммунального хозяйства / К. В. Красильникова, В. И. Соловьев // Инновации в жизнь. — 2016. — № 1 (16). — С. 69–80.

11. Цифровые организации: тенденции и практики применения в России. Режим доступа: http://www.riarating.ru/infografika/20160127/630007042.html (дата обращения 08.11.2022).

12. Рафальская, Т. А. Исследование переменных режимов работы систем централизованного теплоснабжения при качественно-количественном регулировании / Т. А. Рафальская, А. Р. Мансуров, И. Р. Мансурова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2019. — № 10 (2). — С. 79–91.

13. Соловьев, В. И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования / В. И. Соловьев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2019. — № 2 (14). — С. 52–61.

14. Автоматизированные системы диспетчерского управления. Режим доступа: https://politer.info/solutions/asdu/ (дата обращения 12.01.2019).

15. Распоряжение Правительства РФ №1632-р от 28.07.2017. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» // Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Режим доступа: http://base.garant.ru/71734878/ (дата обращения 05.11.2022).

16. Электронное правительство и государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства региона / Якимчук Я. Ю., Мартемьянов В. С., Аверьяскин С. Г., Соловьев В. И. // Инновации в жизнь. — 2014. — № 1 (8). — С. 56–67.

17. Кислов, Д.К. Разработка системы интеллектуального теплоснабжения на базе информационной сети Zulu / Д. К. Кислов, М. С. Рябенко, Т. А. Рафальская // Энергосбережение и водоподготовка. — 2018. — № 2 (112). — С. 55-59. https://www.politerm.com/products/thermo/zuluthermo/ (дата обращения: 15.01.2022).

18. Шишкин А.В. и др. Создание цифрового двойника тепловой сети в различных программных комплексах // Надежность и безопасность энергетики. — 2022. — Т. 15. №. 3. — С. 166–174.

19. Zheng X., Sun Q., Wang Y., Zheng L., Gao X., You S., Zhang H., Shi K. Thermo-hydraulic coupled simulation and analysis of a real large-scale complex district heating network in Tianjin. Energy 2021; 236, 121389.10.1016/j.Energy.2021.121389 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.energy.2021.121389.

20. Zheng J., Zhou Z., Zhao J., Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. Applied Thermal Engineering 2017; (123): 682 - 688.10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083.

21. Falay B., Schweiger G., O'Donovan K., Leusbrock I. Enabling large-scale dynamic simulations and reducing model complexity of district heating and cooling systems by aggregation. Energy 2020; 209, 118410.10.1016/j.Energy.2020.118410 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.energy.2020.118410.

22. Barone G., Buonomano A., Forzano C., Palombo A. A novel dynamic simulation model for the thermo-economic analysis and optimisation of district heating systems. Energy Conversion and Management 2020; 220, 113052.10.1016/j.enconman.2020.113052 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.enconman.2020.113052 (EDN: XCHBYE.

23. Larsen H. V., Palsson H., B0hm B., Ravn H. F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. Energy Conversion and Management 2002; (43): 995-1019.10.1016/S0196-8904(01)00093-0 (дата обращения: 26.12.2022). DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00093-0.

24. Zheng J., Zhou Z., Zhao J., Wang J. Function method for dynamic temperature simulation of district heating network. Applied Thermal Engineering 2017; (123): 682 - 688.10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.083.

25. Hussein A., Klein A. Modelling and validation of district heating networks using an urban simulation platform. Applied Thermal Engineering 2021; 187, 116529.10.1016/j.applthermaleng.2020.116529 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.applthermaleng.2020.116529.

26. Badami M., Fonti A., Carpignano A., Grosso D. Design of district heating networks through an integrated thermo-fluid dynamics and reliability modelling approach. Energy 2018; (144): 826 -838.10.1016/j.Energy.2017.12.071 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.energy.2017.12.071.

27. Schweiger G., Larsson P.-O., Magnusson F., Lauenburg P., Velut S. District heating and cooling systems - Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization. Energy 2017; (137): 566 - 578.10.1016/j.Energy.2017.05.115 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.energy.2017.05.115.

28. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable Energy systems. Energy 2014, (68): 1 - 11.10.1016/j.Energy.2014.02.089 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/j.energy.2014.02.089.

29. Lauenburg P. 11 - Temperature optimization in district heating systems, in: Wiltshire R. (Ed.), Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, Oxford, 2016: 223 - 240.10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2 (дата обращения: 26.12.2022). 10.1016/B978-1-78242-374-4.00011-2.

Поступила в редакцию 21.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Тихомиров Алексей Леонидович — доцент кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, a.l.tikhomirov@yandex.ru.

Пирожникова Анастасия Петровна — старший преподаватель кафедры «Инженерная защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, anastasiapir@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Тихомиров А. Л. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов. Пирожникова А. П. — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.





УДК 624.04
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-43-52

Научная статья



О влиянии выбора основной системы метода сил на точность расчетов при решении плоской задачи теории упругости в напряжениях

Г. Т. Гагалаян ✉, **А. С. Фоминых**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ ggagalayan@mail.ru

Аннотация

Введение. Известно, что решение задачи теории упругости возможно в перемещениях, напряжениях, а также смешанным методом. Наиболее распространен метод конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений, однако он имеет свои недостатки. Целью настоящей статьи является изучение особенностей численного решения плоской задачи теории упругости в напряжениях с использованием метода конечных разностей (МКР) для возможности его использования в качестве альтернативы МКЭ. Рассматриваются варианты выбора основной системы метода сил для получения граничных условий при расчете прямоугольной балки-стенки методом сеток и их влияние на конечный результат при вычислении напряжений.

Материалы и методы. Расчет прямоугольной балки-стенки реализован в программе *Balka-Stenka*, разработанной в ДГТУ. Выполняется сравнение решения на основе метода конечных разностей с решением методом конечных элементов в форме метода перемещений в программном комплексе «ЛИРА-САПР». Точность расчетов определяется путем выполнения статических проверок равновесия отсеченной части конструкции. Для рассматриваемой конструкции проанализированы пять вариантов выбора основной системы метода сил (ОСМС).

Результаты исследования. Впервые установлено, что, в отличие от расчета стержневых систем, выбор ОСМС несущественно влияет на окончательные величины напряжений при решении плоской задачи теории упругости.

Обсуждение и заключение. Сравнение результатов расчета при помощи метода конечных элементов в форме метода перемещений и метода конечных разностей показало некоторые преимущества последнего. Метод конечных разностей может выступить альтернативой методу конечных элементов в форме метода перемещений для решения плоской задачи теории упругости при условии автоматизации процесса построения эпюр внутренних усилий в контуре балки-стенки.

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод конечных разностей, плоская задача теории упругости, балка-стенка, плоское напряженное состояние, рамная аналогия.

Для цитирования. Гагалаян, Г. Т. О влиянии выбора основной системы метода сил на точность расчетов при решении плоской задачи теории упругости в напряжениях / Г. Т. Гагалаян, А. С. Фоминых // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 3. — С. 43–52.
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-43-52

Original article

About Influence of Choosing the Force Method Principal System on the Accuracy of Calculations in Solving a Stress-Based Plane Elasticity Problem

Gurgen T. Gagalayan ✉, **Anna S. Fominykh**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ ggagalayan@mail.ru

Abstract

Introduction. It is known that the solution of a problem in elasticity theory is possible based on displacements, stresses, as well as mixed method. The most common is the displacement-based finite element method (FEM), however, it has its imperfections. The aim of this article is to study the features of numerical solution of a stress-based plane elasticity problem using the finite difference method (FDM) as a possible alternative to the FEM. The options for choosing the force method principal system are considered aiming to obtain the boundary conditions in calculating a rectangular beam-wall by the grid method along with the influence thereof on the final result during stresses calculation.

Materials and methods. The calculation of a rectangular beam-wall is made in Balka-Stenka software developed in DSTU. Comparison between a solution made by the finite difference method and a solution made by the displacement-based finite element method is made in the LIRA-SAPR software. The accuracy of calculations is determined by performing the static balance tests of the cut-off part of a structure. For the structure under consideration, the choice of five options of the force method principal system (FMPS) is analysed.

Results. For the first time the conclusion was made that in contrast to the calculation of bar systems, the choice of FMPS does not significantly affect the final stress values in solving a plane elasticity problem.

Discussion and conclusion. The comparison of calculation results made by the displacement-based finite element method and by the finite difference method showed some advantages of the latter. The finite difference method can act as an alternative to the displacement-based finite element method in solving a plane elasticity problem on condition of automation of the process of building the internal forces epures in a wall beam-wall contour.

Keywords: finite element method, finite difference method, plane stress problem, beam-wall, plane stress state, frame analogy.

For citation. G. T. Gagalayan, A. S. Fominykh. About Influence of Choosing the Force Method Principal System on the Accuracy of Calculations in Solving a Stress-Based Plane Elasticity Problem. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 43–52. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-3-43-52

Введение. В качестве основного метода расчета строительных конструкций в настоящее время выступает метод конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений [1–4].

Недостатками МКЭ в форме метода перемещений являются [5–7]:

1. Пониженная, по сравнению с перемещениями, точность вычисления усилий (напряжений).
2. Сложность учета разрывов значений усилий (напряжений) на межэлементных границах.
3. Неиспользование граничных условий, выраженных в усилиях (напряжениях).
4. «Запирание» при расчете с учетом элементов, обладающих большой сдвиговой жесткостью, когда энергия деформации от сдвига значительно превышает энергию деформации от изгиба.
5. Содержащиеся в кинематических граничных условиях смещения конечного элемента, как жесткого целого, не связанные с работой внутренних сил. Они приводят к ухудшению обусловленности матрицы жесткости

всей конструкции при сгущении конечно-элементной сетки, когда необходимо повысить точность решения в опасных зонах или при итерационном решении нелинейных задач.

6. Сложности при включении в конструкцию недеформируемых элементов и при расчетах геометрически изменяемых систем в виде кинематической цепи.

Альтернативой МКЭ при решении плоской задачи теории упругости (ТУ) выступает метод конечных разностей. При этом в качестве искомой функции выступает функция напряжений.

Классическим объектом, для которого имеет место плоская задача ТУ, является балка-стенка — тонкая пластина, подверженная действию нагрузок, приложенных в ее срединной плоскости.

В качестве граничных условий при расчете балки-стенки выступает рамная аналогия. Если рассмотреть контур балки-стенки как раму, то функция напряжений на контуре будет равна изгибающему моменту, а ее производная по нормали – продольной силе:

$$\varphi = M;$$
$$\frac{\partial\varphi}{\partial\nu} = N. \quad (1)$$

Замкнутый контур балки-стенки при рассмотрении его как рамы является трижды статически неопределимым, однако эпюры M и N можно строить в основной системе метода сил (ОСМС). При этом в зависимости от выбора ОСМС эпюры будут различными, а значит и будет отличаться функция напряжений φ. Однако окончательные значения напряжений должны быть одинаковы, поскольку все функции напряжений, получаемые на основе различных ОСМС, отличаются на линейную функцию $Ax + By + C$. Известно, что для стержневых систем при решении методом сил точность результатов зависит от выбора ОСМС [8–9].

Целью настоящей работы выступает исследование влияния выбора ОСМС на точность определения напряжений в балке-стенке. В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Расчет балки-стенки методом конечных разностей при различных вариантах выбора ОСМС.

2. Расчет той же конструкции при помощи метода конечных элементов в форме метода перемещений.

3. Сопоставление результатов расчета при помощи МКР в различных ОСМС, а также МКР и МКЭ.

Материалы и методы. Задача определения напряжений деформированного состояния балки-стенки сводится к однородному дифференциальному уравнению четвертого порядка в частных производных [10–11]:

$$\nabla^4\varphi = 0, \quad (2)$$

где φ — функция напряжений (функция Эри);

$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial z^4}$ – двойной оператор Лапласа.

Разностная аппроксимация уравнения (2) имеет вид:

$$(6\alpha^2 + 8\alpha + 6)\varphi_k - 4(1+\alpha)(\varphi_a + \alpha\varphi_b + \varphi_c + \alpha\varphi_d) +$$
$$+2\alpha(\varphi_e + \varphi_f + \varphi_g + \varphi_h) + \varphi_i + \alpha^2\varphi_l + \varphi_m + \alpha^2\varphi_n = 0, \quad (3)$$

где $\alpha = \Delta z^2/\Delta x^2$.

Разностная схема (3) имеет второй порядок точности.

Схема узлов к формуле (3) показана на рис. 1.

Уравнение (3) составляется для всех внутренних узлов сетки. При составлении уравнений для смежных к контуру узлов возникает необходимость определения функции напряжений в «законтурных» точках. Для этого используется второе условие в (1).

Нормальные и касательные напряжения при отсутствии объемных сил вычисляются по формулам:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}; \sigma_z = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}; \tau_{xz} = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial z}. \quad (4)$$

Или в форме метода конечных разностей:

$$\sigma_{z,k} = \frac{\varphi_b - 2\varphi_k + \varphi_d}{\Delta x^2};$$
$$\sigma_{x,k} = \frac{\varphi_a - 2\varphi_k + \varphi_c}{\Delta z^2}; \qquad (5)$$
$$\tau_{xz,k} = \frac{(\varphi_g + \varphi_e) - (\varphi_f + \varphi_h)}{4\Delta x \Delta z}.$$

Рис. 1. Схема узлов для составления уравнений МКР (рисунок авторов)

В данной работе рассматривается прямоугольная балка-стенка (тонкая пластина) из изотропного материала, соответствующего закону Гука, загруженная нормальной к контуру поверхностной нагрузкой. При этом сосредоточенная сила F рассматривается как предельный случай равномерно распределенной нагрузки на малом участке балки-стенки. Толщина балки-стенки принимается равной единице.

Требуется определить напряженное состояние пластины. Расчетная схема приведена на рис. 2. Расчет выполняется при a = 9,9 м; b = 13,5 м; q= 30 $\frac{\text{кН}}{\text{м}}$; P= 130 кН; Δx = 1,1 м; Δz = 0,9 м. Конструкция разбивается на 9 интервалов по горизонтали и 15 — по вертикали.

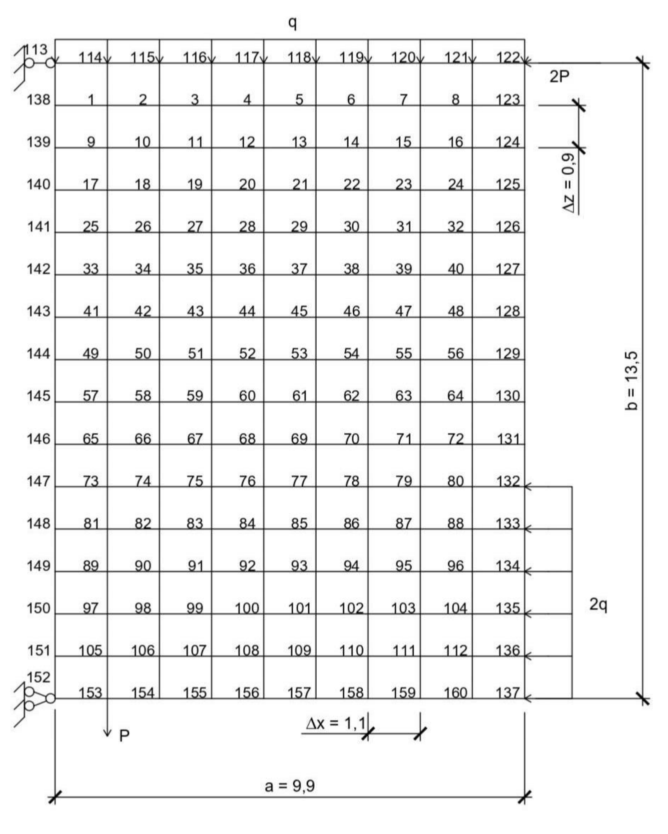


Рис. 2. Исходная схема (рисунок авторов)

В качестве ОСМС рассматриваются варианты, представленные на рис. 3. Опоры в узлах 113 и 152 в ОСМС остаются нетронутыми, в вариантах (а) и (в) врезается три промежуточных шарнира в угловых точках, а в остальных вариантах делается разрез на одной из сторон.

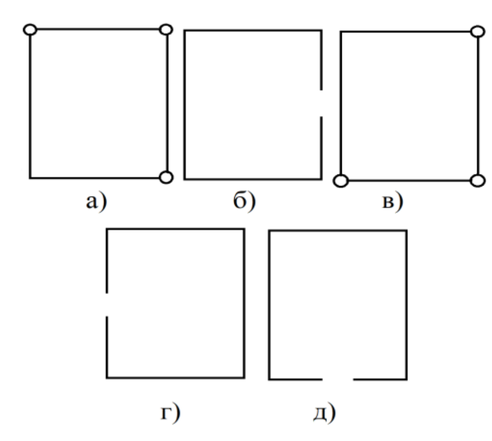


Рис. 3. Варианты ОСМС (рисунок авторов)

Расчет реализован в программе Balka-Stenka, разработанной на кафедре «Сопротивление материалов» Донского государственного технического университета. Общее количество уравнений и неизвестных для рассматриваемой схемы — 112.

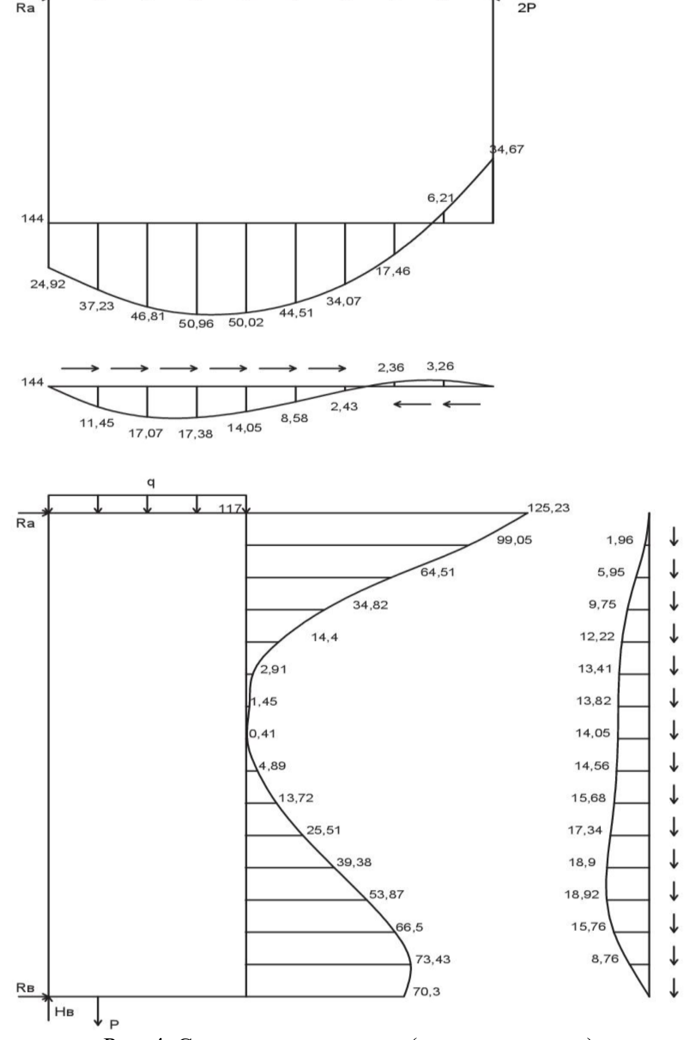


Рис. 4. Статическая проверка (рисунок авторов)

После определения напряжений выполняются две статические проверки равновесия отсеченной части. На рис. 4 показано равновесие верхней и правой отсеченной части при расчете на основе ОСМС варианта (а).

Также выполняется расчет при помощи МКЭ в форме метода перемещений в программном комплексе «ЛИРА-САПР» при том же количестве узлов сетки. При расчете в ПК «ЛИРА» используются плоские прямоугольные конечные элементы балки-стенки (КЭ 21) с двумя степенями свободы в узле (линейные перемещения u и w вдоль осей x и z).

Результаты исследования. В таблицах 1–2 представлены полученные в результате расчета методом конечных разностей с использованием различных ОСМС значения напряжений по линиям 144–129 (горизонтальное сечение) и 117 – 156 (вертикальное сечение). Также в указанных таблицах приведены результаты на основе МКЭ.

Таблица 1

Значения напряжений σ_z и τ_{xz} по линии 144–129

Вариант	Номер узла	144	49	50	51	52
а	σ_z	-24,924	-37,231	-46,807	-50,975	-50,023
	τ_{xz}	0	-11,445	-17,068	-17,384	-14,047
б	σ_z	-24,946	-37,251	-46,818	-50,977	-50,019
	τ_{xz}	0	-11,451	-17,076	-17,393	-14,054
в	σ_z	-24,948	-37,251	-46,817	-50,977	-50,019
	τ_{xz}	0	-11,451	-17,077	-17,393	-14,054
г	σ_z	-25,17	-37,324	-46,783	-50,883	-49,918
	τ_{xz}	0	-11,501	-17,133	-17,424	-14,05
д	σ_z	-25,051	-37,284	-46,793	-50,931	-49,977
	τ_{xz}	0	-11,487	-17,104	-17,399	-14,043
ЛИРА-САПР	σ_z	-30,7	-36,1	-45,4	-50,5	-50,2
	τ_{xz}	-6,33	-10,8	-17,1	-17,9	-14,4
Вариант	Номер узла	53	54	55	56	129
а	σ_z	-44,513	-34,072	-17,462	6,209	34,671
	τ_{xz}	-8,575	-2,431	2,363	3,261	0
б	σ_z	-44,506	-34,064	-17,453	6,219	34,685
	τ_{xz}	-8,58	-2,435	2,361	3,26	0
в	σ_z	-44,506	-34,064	-17,453	6,219	34,685
	τ_{xz}	-8,58	-2,435	2,361	3,26	0
г	σ_z	-44,433	-34,034	-17,471	6,152	34,559
	τ_{xz}	-8,549	-2,392	2,402	3,287	0
д	σ_z	-44,48	-34,056	-17,463	6,191	34,638
	τ_{xz}	-8,561	-2,414	2,379	3,271	0
ЛИРА-САПР	σ_z	-44,4	-32,9	-15	8,83	22
	τ_{xz}	-8,33	-1,81	2,49	2,62	1,54

Таблица 2

Значения напряжений σ_x и τ_{xz} по линии 117–156

Вариант	Номер узла	117	4	12	20
а	σ_x	-125,231	-99,051	-64,507	-34,823
	τ_{xz}	0	-1,958	-5,954	-9,754
б	σ_x	-125,212	-99,038	-64,499	-34,821
	τ_{xz}	0	-1,964	-5,962	-9,763
в	σ_x	-125,213	-99,038	-64,499	-34,821
	τ_{xz}	0	-1,963	-5,962	-9,763
г	σ_x	-125,251	-99,067	-64,526	-34,849
	τ_{xz}	0	-1,965	-5,965	-9,766
д	σ_x	-125,225	-99,049	-64,51	-34,834
	τ_{xz}	0	-1,964	-5,963	-9,764
ЛИРА-САПР	σ_x	-114	-99,8	-88,3	-37,3
	τ_{xz}	-0,582	-1,86	-5,22	-9,33
Вариант	Номер узла	28	36	44	52
а	σ_x	-14,398	-2,907	1,454	0,406
	τ_{xz}	-12,224	-13,406	-13,821	-14,047
б	σ_x	-14,398	-2,911	1,448	0,397
	τ_{xz}	-12,233	-13,414	-13,829	-14,054
в	σ_x	-14,398	-2,911	1,448	0,397
	τ_{xz}	-12,232	-13,414	-13,829	-14,054
г	σ_x	-14,429	-2,942	1,422	0,386
	τ_{xz}	-12,235	-13,415	-13,827	-14,05
д	σ_x	-14,414	-2,929	1,429	0,383
	τ_{xz}	-12,233	-13,413	-13,824	-14,043
ЛИРА-САПР	σ_x	-14,6	-1,88	1,76	0,61
	τ_{xz}	-12,6	-13,9	-14,3	-14,4
Вариант	Номер узла	60	68	76	84
а	σ_x	-4,885	-13,717	-25,506	-39,38
	τ_{xz}	-14,564	-15,675	-17,342	-18,897
б	σ_x	-4,897	-13,732	-25,523	-39,396
	τ_{xz}	-14,57	-15,679	-17,342	-18,89
в	σ_x	-4,897	-13,732	-25,523	-39,396
	τ_{xz}	-14,57	-15,679	-17,342	-18,89
г	σ_x	-4,877	-13,667	-25,408	-39,247
	τ_{xz}	-14,568	-15,688	-17,379	-18,962
д	σ_x	-4,898	-13,706	-25,455	-39,283
	τ_{xz}	-14,551	-15,653	-17,318	-18,892
ЛИРА-САПР	σ_x	-4,14	-13,4	-25,8	-40,6
	τ_{xz}	-15	-16,4	-18,5	-20
Вариант	Номер узла	92	100	108	156
а	σ_x	-53,872	-66,502	-73,431	-70,302
	τ_{xz}	-18,924	-15,761	-8,761	0
б	σ_x	-53,881	-66,496	-73,404	-70,264
	τ_{xz}	-18,91	-15,741	-8,744	0
в	σ_x	-53,881	-66,496	-73,404	-70,264
	τ_{xz}	-18,91	-15,741	-8,744	0
г	σ_x	-53,735	-66,382	-73,386	-71,111
	τ_{xz}	-18,983	-15,723	-8,633	0
д	σ_x	-53,759	-66,469	-73,571	-70,422
	τ_{xz}	-18,968	-15,842	-8,732	0
ЛИРА-САПР	σ_x	-55,4	-86,9	-71,8	-72,2
	τ_{xz}	-18,8	-14,1	-7,1	-3,15

В таблицах 3–4 представлены полученные погрешности статических проверок равновесия левой и верхней отсеченной части при различных вариантах ОСМС, а также при расчете с помощью МКЭ в программном комплексе «ЛИРА-САПР».

Таблица 3

Погрешности статической проверки равновесия левой отсеченной части

Погрешность	ΣX	ΣZ	ΣM
а)	0,313 %	0,478 %	0,0805 %
б)	0,001 %	0,476 %	0,133 %
в)	0,001 %	0,476 %	0,133 %
г)	0,0036 %	0,461 %	0,0827 %
д)	0,00103 %	0,465 %	0,16 %
ЛИРА-САПР	0,0405 %	0,611 %	0,522 %

Таблица 4

Погрешности статической проверки равновесия верхней отсеченной части

Погрешность	ΣX	ΣZ	ΣM
а)	0,979 %	0,0017 %	0,454 %
б)	0,99 %	0,73 %	0,464 %
в)	0,99 %	0,73 %	0,464 %
г)	1,007 %	0,0056 %	0,453 %
д)	0,988 %	0,0017 %	0,462 %
ЛИРА-САПР	0,942 %	0,0069 %	0,542 %

Из таблиц 1–2 видно, что напряжения при расчете методом конечных разностей при выборе основной системы метода сил по схемам «а–д» отличаются незначительно. Среднее расхождение результатов, полученных при помощи МКР, с решением на основе метода конечных элементов составляет 13,9 % по напряжениям σ_x, 7,2 % по напряжениям σ_z и 7,7 % по напряжениям τ_{xz} (без учета крайних узлов). Следует также обратить внимание на то, что в лежащих на контуре балки-стенки узлах 144, 129, 117, 156 при расчете методом конечных элементов касательные напряжения τ_{xz} оказываются отличными от нуля, что противоречит условиям на поверхности:

$$X_\nu = \sigma_x \cdot l + \tau_{xz} \cdot n,$$
$$Z_\nu = \tau_{zx} \cdot l + \sigma_z \cdot n, \quad (6)$$

где X_ν и Z_ν составляющие поверхностной нагрузки по осям x и z; l = cos(x,ν); n = cos(z,ν) – направляющие косинусы нормали к поверхности балки-стенки ν.

Невыполнение условий на поверхности по касательным напряжениям при расчете в ПК «ЛИРА» можно объяснить тем, что напряжения в данном программном комплексе вычисляются только в центрах конечных элементов, и выведенные значения для узлов 144, 129, 117, 156 на самом деле соответствуют точкам, смещенным на $\Delta x/2$ или $\Delta z/2$.

В то же время эта особенность никак не отразилась на погрешностях статических проверок, они сопоставимы с результатами, полученными при помощи метода конечных разностей региона [9].

Обсуждения и заключения. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Выбор основной системы метода сил практически не влияет на результат по напряжениям.

2. Точность решения при помощи метода конечных элементов сопоставима с точностью метода конечных разностей, но при решении методом конечных элементов при одинаковой густоте сетки число неизвестных в узле в 2 раза больше (перемещения u и w).

3. Недостатком МКЭ по сравнению с МКР является невозможность точного определения напряжений непосредственно на поверхности конструкции.

4. МКР может служить альтернативой МКЭ в форме метода перемещений при решении плоской задачи теории упругости в случае автоматизации процесса построения эпюр изгибающего момента и продольной силы в контуре балки-стенки, как в раме.

Библиографический список

1. Фокин, В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела / В. Г. Фокин. — Самара: Самарский гос. технический ун-т, 2010. — С. 22. URL: http://meh.samgtu.ru/sites/meh.samgtu.ru/files/fokin.pdf

2. Языев, Б. М. Расчёт трёхслойной пластинки методом конечных элементов с учётом ползучести среднего слоя / Б. М. Языев и др. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2014. — Т. 33, №. 2. — С. 47–55.

3. Chepurnenko, A. Finite element modeling of the creep of shells of revolution under axisymmetric loading / A. Chepurnenko, N. Neumerzhitskaya, M. Turko // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Springer, Cham, 2017. — P. 808–817. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_86.

4. Chepurnenko, A. Calculation of a three-layer plate by the finite element method taking into account the creep of the filler / A. Chepurnenko, A. Savchenko, S. Yazyeva // MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2017. — Vol. 129. — P. 05008. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201712905008.

5. Игнатьев, А. В. Развитие метода конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики / А. В. Игнатьев // Дисс. д-ра техн.технических техн. 543 наук: 05.23.17. — Волгоград, 2019. — С. 294. — URL: https://www.vstu.ru/upload/iblock/65a/65a405ea74517bf03e889045eda7ad00.pdf.

6. Игнатьев, А. В. Применение метода конечных элементов в форме классического смешанного метода к расчету систем с односторонними связями / А. В. Игнатьев, В. А. Игнатьев, М. И. Бочков // Строительная механика и расчет сооружений. — 2017. — № 2. — С. 52–61.

7. Игнатьев, А. В. Расчет тонких пластин по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода с исключением перемещений конечных элементов как жесткого целого / А. В. Игнатьев, В. А. Игнатьев, Е. А. Гамзатова // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2018. — №. 3. — С. 5–13.

8. Радкевич, Р. А. О влиянии выбора варианта основной системы метода сил для бесшарнирной арки на устойчивость решения канонических уравнений / Р. А. Радкевич // Строительные конструкции. — Новополоцк: ПГУ, 2015. — С. 77. URL: https://elib.psu.by:8080/bitstream/123456789/15391/5/Труды%20молодых_2015%20Вып.9_ СТРОИТЕЛЬНЫЕ%20КОНСТРУКЦИИ.pdf#page=9

9. Романова, М. В. О влиянии выбора варианта основной системы метода сил на достоверность расчета рамных конструкций / М. В. Романова // Строительные конструкции. — Новополоцк: ПГУ, 2014. — Р. 52. — URL: https://elib.psu.by/bitstream/123456789/17465/5/3_74 %20Строительные %20конструкции.pdf#page=4

10. Kozelskaya, M. Stress strain behavior research of triangular dam using analytical and numerical methods / M. Kozelskaya, D. Donskova, V. Ulianskaya, P. Shvetsov // IPICSE-2018. — 2018. — No 251. — P. 8. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201825104043.

11. Донскова, Д. О. Особенности расчета треугольной плотины численным и аналитическим методом / Д. О. Донскова // Молодой исследователь Дона. — 2019. — № 2 (17). — С. 9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rascheta-treugolnoi-plotiny-chislennym-i-analiticheskim-metodom.

Поступила в редакцию 18.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Гагалаян Гурген Татеосович — студент факультета «Промышленное и гражданское строительство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, ggagalayan@mail.ru, тел.: +7 (950) 865-43-26.

Фоминых Анна Сергеевна — студент факультета «Промышленное и гражданское строительство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, fomanya03@gmail.com, тел.: +7 (908) 517-41-66.

Заявленный вклад авторов:

А. С. Фоминых — проведение расчетов в программе *Balka-Stenka*, подготовка текста статьи. Г. Т. Гагалаян — проведение расчетов в ПК «ЛИРА», подготовка графической части, редактирование текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.